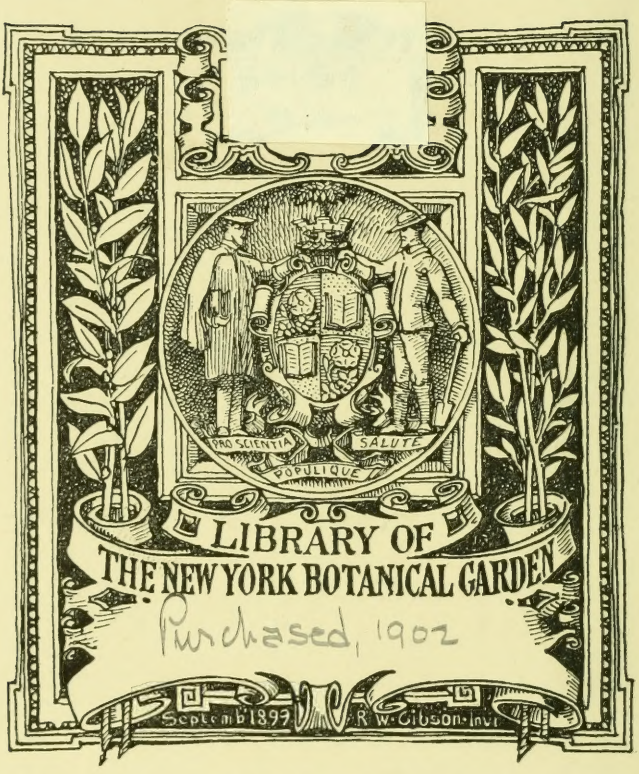

PRO SCIENTIA
SALUTE
POPULIQUE
LIBRARY OF
THE NEW YORK BOTANICAL GARDEN
Purchased, 1902
Septemb 1899
R. W. Gibson. Invt

LIBRARY
NEW YORK
BOTANICAL
GARDEN

DIE BEWEGUNG

DER

PFLANZLICHEN FLUGORGANE.

EIN BEITRAG ZUR PHYSIOLOGIE

DER

PASSIVEN BEWEGUNGEN IM PFLANZENREICH.

VON

HERMANN DINGLER.

MIT ACHT TAFELN.

MÜNCHEN.

THEODOR ACKERMANN

KÖNIGLICHER HOF-BUCHHÄNDLER

1889.

QK 711
.D5

Vorwort.

Aus einer kleinen Mittheilung über Transport von Früchten und Samen, welche ich vor einiger Zeit gelegentlich einer zufälligen Beobachtung gemacht hatte, ist ein Buch geworden, welches die einschlägigen Fragen, soweit sie ohne besondere Hülfsmittel experimentell zugänglich waren, in prinzipieller Weise behandeln und zu einem gewissen Abschluss bringen sollte. Bei etwas weiterer Umschau stellte sich nämlich heraus, dass hier ein bisher so gut wie gar nicht berührtes sehr interessantes Gebiet der Forschung harre. Mit der eingehenderen Beschäftigung wuchs das Interesse an der Sache.

Die aktiven Lebenserscheinungen bieten dem Physiologen unzweifelhaft Probleme von grösserer Tragweite, aber der Reiz, ein noch fast gänzlich unkultivirtes Gebiet neu zu erschliessen, sowie das direkte Interesse an den mechanisch in eben so hohem Grade anziehenden als biologisch wichtigen Vorgängen überwog alle Bedenken.

Bei den Berechnungen des Luftwiderstandes habe ich mich an die alte quadratische Luftwiderstandsformel gehalten, welche ja zwischen ziemlich weiten Grenzen der Geschwindigkeit annähernd richtige Resultate gibt, wenn man die entsprechenden Erfahrungskoeffizienten einführt. Als einheitlicher Massstab für die Leistungs-

grösse diente die gleiche Formel mit Vernachlässigung der Erfahrungskoeffizienten. Sie scheint mir innerhalb der hier vorkommenden Geschwindigkeitsgrenzen das beste Mass abzugeben. Die neueren Untersuchungen über den Luftwiderstand, dieses Schmerzenskind der Physik, namentlich diejenigen von Recknagel und anderen sind noch nicht allseitig genug ausgedehnt worden, um sich für einen Zweck wie den vorliegenden zur Verwerthung zu eignen.

Zwei kleine Aufsätze von F. Ludwig, welche hierhergehörige Themata behandeln, resp. deren Referat im „Biologischen Zentralblatt", sind erst längere Zeit nach Beginn des Druckes vorliegenden Buches zu meiner Kenntniss gelangt. Dieselben konnten in Folge dessen erst in den „Zusätzen zum XII. Haupttypus" S. 310 Berücksichtigung finden.

Über die Art der Behandlung des Gegenstandes wäre vieles zu sagen. Jeder, der mit mechanischen Problemen einigermassen vertraut ist, wird gewisse Schwierigkeiten solcher Darstellungen zu würdigen wissen. Die Bewegungsvorgänge, welche hier behandelt werden, gehören zum Theil mit zu den verwickeltesten, jedenfalls den mathematisch am schwierigsten angreifbaren in der gesammten Mechanik. Eine exakte mathematische Lösung derselben ist zur Zeit wohl überhaupt unmöglich, ausserdem hätte eine solche für das botanische Publicum, für welches ja diese Arbeit bestimmt ist, nur bedingten Werth. Es schien mir im Interesse des erleichterten Verständnisses für einen weiteren Leserkreis nützlich, einige allgemeinere theoretische Vorbemerkungen zu machen, welche gleichzeitig die Stelle einer kurzen Terminologie vertreten sollten. Einige umständlichere Berechnungen, sowie Andeutungen zu solchen sind, um den Text nicht

allzusehr zu belasten, in die „Zusätze“ zu dem betr. Kapitel verwiesen.

Zu den Kurvendarstellungen, wie sie zum Verständniss der Bewegungen mehrfach nothwendig erschienen, möchte ich hier nicht unterlassen, ausdrücklich zu betonen, dass dieselben nach der mir einzig möglichen Art der Aufnahme durch viele Fallversuche nicht ganz exakt sein können. Sie geben nur annähernd die Schwerpunktsbahnen der betreffenden Flugkörper resp. ihrer Modelle wieder.

Untergeordnetere Einzelfragen sind in der Regel nicht behandelt. Näheres Eingehen auf dieselben hätte gegen das überaus wichtige Prinzip der Beschränkung verstossen.

Es drängt mich, an dieser Stelle allen jenen Herren, welche mich in zuvorkommendster Weise durch Litteraturangaben oder anderweitig mit Rath und That unterstützten, meinen wärmsten Dank auszusprechen. Ganz besonders verpflichtet bin ich aber meinem hochverehrten Lehrer und Chef, Herrn Professor Dr. von Nägeli, ohne dessen gütige Genehmigung es mir unmöglich gewesen wäre, die zum Theil sehr zeitraubenden Versuche anzustellen. Die Zahl dieser Versuche ist weit grösser als im Buche angegeben ist, indem nur ein relativ kleiner Theil zur Veröffentlichung ausgewählt wurde. Der grossen Liberalität des Herrn Geheimrathes Professor Dr. von Sachs in Würzburg, welcher meiner Arbeit das aufmunterndste Interesse entgegenbrachte, verdanke ich kostbares Untersuchungsmaterial und Herrn Professor Dr. Radlkofer dahier schulde ich werthvolle Angaben über die Verbreitung gewisser Flugeinrichtungen.

Weit entfernt bin ich, zu glauben, dass mit vorliegenden Blättern das behandelte Thema erledigt oder

auch nur nahezu erledigt wäre. Aber es ist wenigstens eine Basis für weitere Arbeit geschaffen. Prinzipiell neues ist voraussichtlich nicht mehr zu erwarten.

Über das Verhalten gewisser Typen der natürlichen Flugorgane im horizontalen Luftstrome werde ich nach Anstellung einiger, mir bislang unmöglicher Versuche seiner Zeit berichten.

München im Dezember 1888.

Der Verfasser.

Inhalt.

Seite

Einleitung 1

I. Abschnitt. Einiges Allgemeine zur Mechanik der Vorgänge.

Schwerkraft und Luftwiderstand 7
Verhalten freidrehender Körper im luftleeren Raum. Hauptträgheitsaxen. Stabilität. Poinsot's Zentralellipsoid . . . 11
Drehung in der Luft 13
Axenbenennung 14
Axen im Raum 15
Grösse der wirksamen äusseren Kräfte 15
Grösse des Luftwiderstandes 17
Grösse der Erfahrungskoeffizienten für verschiedene Widerstandsflächen 24
Fallende Körper im Winde 27

II. Abschnitt. Untersuchungsmethoden.

Allgemein angewandte Methoden 31
Experimentelle Feststellung des Angriffspunktes des Luftwiderstandes an zu ihm schief gestellten Flächen 35

III. Abschnitt. Spezielle Betrachtung.

A. Eintheilung der pflanzlichen Flugorgane 40
B. Charakteristik der Haupttypen. Versuchsergebnisse. Mechanische Erklärung der Bewegungen 46
I. Haupttypus. Die staubförmigen Flugorgane . . . 46
Micrococcus 47
Sporen von Lycoperdon caelatum 49
Leistungsgrösse des Typus 56
Zur Mechanik der Fallbewegung 60
II. Haupttypus. Die körnchenförmigen Flugorgane . . 62
Samen von Papaver somniferum 63
Samen von Pitcairnia flavescens 65
Leistungsgrösse des Typus 66

Seite

III. Haupttypus. Die blasig aufgetriebenen Flugorgane . 67
Achenen von Cynara Scolymus 70
Leistungsgrösse des Typus 74
Zur Mechanik des Rollens 74
IV. Haupttypus. Die haarförmigen Flugorgane . . . 76
Samen von Pitcairnia imbricata 76
Leistungsgrösse des Typus 80
Mechanik der Einstellung 81
V. Haupttypus. Die scheibenförmigen Flugorgane . . 92
Samen von Aspidosperma sp. 93
Leistungsgrösse des Typus 95
Zur Mechanik des Vorganges 96
VI. Haupttypus. Die konvex scheibenförmigen Flugorgane 99
Früchte von Ptelea trifoliata 101
Samen von Eccremocarpus scaber 103
Samen von Cochlospermum orenocense 104
Leistungsgrösse des Typus 105
Zur Mechanik der Einstellung 106
VII. Haupttypus. Die fallschirmförmigen Flugorgane . 111
Achenen von Asterocephalus sp. 113
Leistungsgrösse des Typus 116
Mechanik der Einstellung 117
VIII. Haupttypus. Die flügelwalzenförmigen Flugorgane . 119
Früchte von Combretum sp. 121
Früchte von Halesia tetraptera 123
Leistungsgrösse des Typus 125
IX. Haupttypus. Die länglich plattenförmigen Flugorgane 126
Früchte von Ailanthus glandulosus 130
Samen von Bignonia unguis 135
Samen von Tecoma stans 137
Samen von Entada 140
Leistungsgrösse des Typus 141
Zur Mechanik der Bewegung 144
a. Die Einstellung 145
b. Die Vertikalrotation 148
c. Die spiralige Bahn 177
Rückblick 185
Zusätze zum IX. Haupttypus 186
X. Haupttypus. Die länglich plattenförmigen Flugorgane mit einer belasteten Längskante 191
Samen von Bignonia echinata 192
Samen von Calosanthes indica 203
Samen von Bignonia cyrtantha 205
Samen von Zanonia javanica 206
Leistungsgrösse des Typus 208

Seite

Zur Mechanik der Bewegung 210
a. Die Vertikalbewegung 210
b. Die Horizontalbewegung 220
c. Einiges experimentelle 222

XI. Haupttypus. Die länglich plattenförmigen Flugorgane mit einer belasteten Kurzkante 227

Früchtchen von Liriodendron tulipifera 229
Früchte von Fraxinus excelsior 230
Leistungsgrösse des Typus 233
Zur Mechanik des Vorganges 233

XII. Haupttypus. Die länglich plattenförmigen Flugorgane mit einer schwach belasteten Längs- und einer stark belasteten Kurzkante 241

Früchte des Spitzahorn (Acer platanoides) . . . 252
Früchte des Traubenahorn (Acer pseudoplatanus) . 266
Früchte von Machaerium augustifolium 271
Samen der Fichte (Picea excelsa) 272
Samen der Tanne (Abies pectinata) 273
Samen der Kiefer (Pinus sylvestris) 274
Früchte von Carpinus betulus 276
Samen von Cedrela brasiliensis 277
Leistungsgrösse des Typus 280
Zur Mechanik der Bewegung 281
a. Die Einstellung 283
b. Die typische Bewegung 284
c. Einiges experimentelle 291
d. Die Spiralbahn 299
Rückblick 309
Zusätze zum XII. Haupttypus 310

Zwischentypen 319

Samen von Catalpa bignonioides 319

IV. Abschnitt. Gesammt-Überblick. 322

Figurenerklärung 333
Berichtigungen 342
Tafel I—VIII.

Ein interessantes und wichtiges Gebiet der pflanzlichen Funktionslehre ist bisher immer noch relativ wenig bearbeitet worden, und doch hängt die Existenz vieler Organismen, die Erhaltung und Ausbreitung unzählig vieler Gattungen und Arten, aufs innigste damit zusammen. Ich meine nämlich den Theil derselben, welcher sich mit der Funktion gewisser Anhangsgebilde von Früchten und Samen befasst.

Manche der im grossen Umbildungsprocess der organischen Welt bis heute erhaltenen alten, sowie eine grosse Zahl der in der heutigen Lebewelt sich vordrängenden neuen Formen — ich erinnere für die ersteren an gewisse Coniferen, für die letzteren an viele Compositen — verdanken ihre rasche Verbreitung zum grossen Theile der Wanderfähigkeit ihrer in Samen- oder Fruchthüllen eingeschlossenen Keimlinge. Diese Wanderfähigkeit wird aber nur ermöglicht durch die genannten Anhangsgebilde, welche nichts anderes als Wanderapparate darstellen.

Es ist das Wandern hier zwar ein passives, indem die grob mechanischen Vehikel bewegter Luft oder andere ortsbewegende Kräfte dazu nöthig sind, aber es geschieht in hervorragender Weise zum Nutzen der betreffenden Art und wird nur dadurch ermöglicht, dass die Mutterpflanze den Organen die nöthige eigenartige Ausbildung mit auf den Weg gibt. Wenn irgendwo, ist hier der Begriff des Zweckmässigen in der Natur gerechtfertigt. —

Der Nutzen solcher Bildungen wurde schon von A. P. Decandolle gewürdigt. Neuerdings haben ausser Darwin namentlich Nägeli, Delpino und Sachs gelegentlich darauf hingewiesen. Zusammenfassend hat zuerst Hildebrand's verdienstvolles Buch „die Verbreitungsmittel der Pflanzen“ die Vielgestaltigkeit derartiger Einrichtungen und ihre biologische Bedeutung behandelt. Dagegen wurden die

Vorgänge selbst, die Physiologie der betreffenden Funktionen, bisher ungenügend studirt. Namentlich gilt dies betreffs der Flugapparate. Genau genommen beschränkt sich die einschlägige Litteratur auf Kerner's interessanten Aufsatz „Über die Verbreitungsmittel der Samen im Hochgebirge" und auf die Abhandlung „Uber die Bewegung kleinster Körperchen" von Nägeli. In letzterer erläutert der berühmte Autor die Bedingungen der Fortführung von Spaltpilzen, sowie anderen staubförmigen Körpern in streng physiologischer Weise. —

Es ist eine bekannte, auch für die Thiere bis zu einem gewissen Grade gültige Thatsache, dass die Organismen, welche gleiche Lebensweise und gleiche Bedürfnisse haben, sich gegenseitig Konkurrenz bereiten. Sie entziehen sich in allzu enger Berührung gegenseitig zum Leben nothwendige Dinge. Es muss somit einem heranwachsenden pflanzlichen Organismus, welcher ja keine Wartung und Pflege braucht, von Vortheil sein, wenn er nicht allzu nahe der Mutterpflanze oder einer anderen Pflanze von ähnlichen Bedürfnissen zur Entwickelung gelangt.

Unsere öfter sehr einförmigen Wälder verdanken, wo nicht die Hand des Menschen ihr störendes Spiel treibt, nur der Armuth an Konkurrenten um den Boden diese Einförmigkeit. Die grösste ursprüngliche Einförmigkeit herrscht darum in der oberen Baumregion des Hochgebirges und in den Wäldern des hohen Nordens. Schon in unseren Ebenen und niedrigen Gebirgsgegenden herrscht bei ungestörter Entwickelung relativ grosse Mannigfaltigkeit und in den feuchten Tropenländern, wo die Zahl der Mitbewerber eine enorme ist, wird der Wald so bunt an Formen wie das Arboretum eines botanischen Gartens.

Es deutet dies darauf hin, dass innerhalb gewisser Grenzen Mischung dem Fortbestehen möglichst vieler Formen am zuträglichsten ist. Ohne das könnte sich dieser Zustand der Dinge ja nicht dauernd erhalten. Damit aber jede einzelne Art den ihr zusagenden Platz zu finden im Stande ist, müssen ihre Samen dahin gelangen können.

Sehen wir bei ruhiger Luft einen reifen Fichtensamen vom Baume fallen, so fällt derselbe trotz bedeutender Fall-

verzögerung senkrecht oder nahezu senkrecht herab. Dieses verlangsamte Herabfallen hat an und für sich keine Bedeutung. Mit oder ohne dasselbe erreicht der Same beim Niederfallen denselben Punkt des Bodens unterhalb der Krone des mütterlichen Baumes, ganz ebenso wie die mit grosser Geschwindigkeit fallende Eichel. Vergleichen wir aber bei bewegter Luft beiderlei Vorgänge, so sehen wir, wie der Fichtensame erst in weitem Bogen zur Erde gelangt. Bei kräftigen Windstössen, welche durch das Anprallen an die Krone des Baumes schief aufwärts gerichtete Luftströmungen erzeugen, wird er sogar in die Höhe geführt und dadurch befähigt, relativ grosse Strecken in horizontaler Richtung zurückzulegen, mit anderen Worten sich weit von dem mütterlichen Organismus oder gleichgearteten Nachbarn, welche ihn in seiner Entwicklung hemmen würden, zu entfernen. Unter den Samen, welche auf diese Art weit umhergestreut werden, wird so eine grössere Zahl Orte finden, welche die für sie geeigneten Bedingungen zur Entwickelung bieten.

Die schwere Eichel dagegen wird trotz heftiger Windstösse nicht weit von ihrer Mutterpflanze sich entfernen können, ihre Fallgeschwindigkeit ist zu gross, als dass die geringe Geschwindigkeit des Luftstromes im Stande wäre, eine bedeutende seitliche Ablenkung der Bahn von der lothrechten zu erzeugen. Die Eichel fällt mit oder ohne Wind nahe am Fuss der Stammpflanze zur Erde nieder, sie ist behufs ihrer Verbreitung auf andere fortbewegende Kräfte als den Wind angewiesen.

Gegenüber der kompakten, rundlichen, dem Winde wenig Angriffspunkte bietenden schweren Eichel sehen wir beim Fichtensamen dagegen eine überaus grosse Oberflächenentwicklung bei relativ und absolut geringerem Gewicht. In demselben Masse, wie beim senkrechten Fall durch die eigenthümliche Ausbildung die Bewegung verzögert wird, wird mehr oder weniger auch die Möglichkeit der seitlichen Fortbewegung gesteigert. Ausserdem bietet die lange Zeit, während der ein Same beim Fall sich frei schwebend in der Luft befindet, hinreichende Gelegenheit, dass einer der vielfach wechselnden Windstösse ihn erreicht, bevor er auf

den Boden gelangt. Einmal auf der Erde angekommen, ist seine Flugthätigkeit meist zu Ende.

Betrachten wir die verschiedenen Fortpflanzungsorgane, deren Bestimmung es ist, durch bewegte Luft verführt zu werden, so ist deren äussere Ausbildung überaus mannigfaltig. Das allgemein durchgehende Prinzip ist Oberflächenvergrösserung bei möglichst geringer Steigerung des Gewichtes. In den einfachsten Fällen ist dies erreicht durch sehr bedeutende Kleinheit der betreffenden Körper, welche dabei sogar die an sich für den Luftwiderstand ungünstige kugelige Gestalt behalten können. In anderen Fällen ist Verminderung des spezifischen Gewichtes, bei mehr oder weniger kugeliger Gestalt des Organs, erreicht durch blasige Ausbildung, indem grössere oder kleinere luftgefüllte Räume in demselben entstehen, oder sehr vergrösserte blasige Hüllen um dasselbe ausgebildet werden. Diese blasigen Hüllen können dabei eine ganz verschiedene Herkunft und Entwicklungsgeschichte haben. Öfter bilden sie besondere Anhängsel an das eigentliche Organ. Schliesslich sehen wir ein Heer von Formen, welche in Gestalt von häutigen oder haarigen Anhängseln der mannigfachsten Art Organe zur Ausnützung des Luftwiderstandes besitzen.

Lassen wir alle diese verschiedenen Flugorgane nun funktionieren, d. h. setzen wir sie dem Winde aus, oder noch einfacher, lassen wir sie aus hinreichender Höhe zu Boden fallen, so beobachten wir, dass sie sich entsprechend der Grösse und Richtung des auf sie einwirkenden Luftwiderstandes ganz verschieden verhalten. Die einen fallen, wenn auch mit relativ verlangsamter Geschwindigkeit, senkrecht zur Erde nieder, die andern bewegen sich in einer spiraligen Bahn herab oder schlagen eine, von der lothrechten nur in einer Richtung abweichende, in der Horizontalprojektion fast geradlinige Bahn ein. Dabei behalten die einen ihre relative Stellung bei, wogegen andere mehr oder weniger rasche Drehungen ausführen. Diese Drehungen können ihrerseits wieder um ganz verschiedene Axen des Körpers vor sich gehen.

Für alle diese Vorgänge sind nun wichtig einerseits die äussere Gestalt überhaupt und andererseits die Massenver-

theilung, also die Lage des Schwerpunktes. Vergleicht man die Art der Funktion mit der äusseren Gestalt und der Lage des Schwerpunktes bei den einzelnen, so überaus mannigfaltig gestalteten Formen, so erkennt man, dass einfache mechanische Gesetze alle diese Bewegungen beherrschen und dass äusserlich sehr verschiedene Ausbildungen oft unter demselben Gesichtspunkt zu betrachten sind.

Nachdem die pflanzlichen Flugorgane kein aktives Bewegungsvermögen besitzen, so sind sie auf die möglichste Ausnützung der Luftströmungen, horizontaler sowohl wie aufsteigender angewiesen. Die in der Nähe des Bodens erzeugten Fortpflanzungsorgane niedriger Sträucher und Kräuter namentlich auf die letzteren. Aufsteigende Luftströme allein sind im Stande, solche über weitere Strecken hinwegzuführen. Ausserdem muss sie der Luftstrom auf dem Boden hinwälzen, falls sie dazu geeignete Gestalt besitzen. Fliegend können sie bei rein horizontaler Strömung nicht allzu weit gelangen. Fällt dagegen ein solches auf Ausnützung des Luftwiderstandes angelegtes Organ aus bedeutender Höhe einer Baumkrone herab, so kann es schon mit Hülfe horizontaler Luftströme bedeutende Entfernungen zurücklegen, bevor es auf den Boden gelangt. Übrigens gibt es Constructionen, welche dem Organe gestatten, sich sogar bei ganz ruhiger Luft nicht unbeträchtlich von seiner Erzeugungsstelle, wenn diese anders hoch genug über dem Boden liegt, zu entfernen.

Ob nun die Organe in ruhiger Luft herabsinken oder durch senkrecht aufsteigende Ströme in die Höhe geführt werden, oder ob sie endlich durch mehr oder weniger schiefe oder horizontale Luftströmungen weitergetragen werden, je nachdem werden sie sich etwas anders einzustellen suchen. In den beiden ersteren Fällen ist das Verhalten gleich, denn es ist in mechanischem Sinne dasselbe, ob das Organ in ruhender Luft herabfällt oder ob es sich in einem aufsteigenden Luftstrome ruhend oder mit aufsteigend befindet. Relativ zur umgebenden Luft fällt es immer herab und nur wenn die Geschwindigkeit des aufsteigenden Stromes die Fallgeschwindigkeit übertrifft, wird es in die Höhe geführt. Luftwiderstand und Schwere wirken in beiden

Fällen ganz gleich, und zwar in einander entgegengesetzter Richtung.

Bei horizontal gerichteten oder schief aufsteigenden Luftströmungen dagegen verhält sich die Sache etwas anders. Die Richtungen des Angriffs der Schwere und des Luftwiderstandes schliessen in diesen Fällen mit einander Winkel ein, welche von einem rechten bis gegen zwei rechte variiren. Je steiler ein Luftstrom aufsteigt, um so mehr nähert sich das Verhalten dem oben betrachteten beim senkrechten Fall. Je horizontaler derselbe dagegen sich bewegt, um so verschiedener wird seine Wirkung sein und das bewegte Organ wird, wenn es nicht eine homogene Kugel mit zentralem Schwerpunkt darstellt, sich anders zur Horizontalen einstellen. Seine ganze Bewegung wird dadurch, abgesehen von der seitlichen Ablenkung, welche die Bahn erfährt, gewisse Modifikationen erleiden.

Immerhin ist das Verhalten der Organe im freien senkrechten Fall dasjenige, dessen Studium den sichersten Aufschluss überhaupt über die Art der Bewegung gibt und wenigstens auf indirektem Wege Schlussfolgerungen über das Verhalten zu mehr oder weniger horizontalen Luftströmungen gestattet. Es gibt ausserdem den einzigen praktisch möglichen Weg zu ausgedehnteren Versuchen an die Hand. Versuche mit künstlich erzeugten Luftströmungen, in welchen die Organe frei funktioniren können, sind ohne ganz besondere Hülfsmittel nicht durchzuführen und überhaupt mit den allergrössten Schwierigkeiten verbunden. Auch Versuche mit den natürlichen Luftströmen, dem Wind, lassen sich nur unter ganz besonderen Verhältnissen anstellen und können höchstens Aufschluss über die Grösse der Transportfähigkeit überhaupt, kaum aber über die feinere Mechanik der dabei stattfindenden Vorgänge gewähren. Vorliegende Blätter beschäftigen sich daher auch so gut wie ausschliesslich mit dem Verhalten der verschiedenen Typen der Flugorgane beim senkrechten Fall.

Durch beliebige andere Ursachen als Schwere und Luftwiderstand, z. B. durch die Hygroskopicität der Flugapparate erzeugte Bewegungen fallen ausserhalb des Rahmens vorliegender Untersuchungen.

I. Abschnitt.

Einiges Allgemeine zur Mechanik der Vorgänge.

Schwerkraft und Luftwiderstand.

Bekanntlich wirken auf alle frei fallenden Körper zwei Kräfte, die Anziehungskraft der Erde, welche als senkrecht nach abwärts gerichteter Zug im Schwerpunkt angreift und der Luftwiderstand, welcher als der Bewegungsrichtung des Körpers entgegengesetzter Druck und seitliche Reibung sich äussert. Der Ort des Angriffspunktes der letzteren Kraft wird jedoch nur von der äusseren Gestalt des Körpers bedingt. Während der Angriffspunkt der Schwerkraft in allen Lagen des Körpers der nämliche bleibt, wechselt derjenige der Resultante des Luftwiderstandes bei Lageveränderung nicht kugelförmig gestalteter Körper seinen Ort.

Der Luftwiderstand wirkt nur dann so gut wie gleichmässig stark auf jedes kleinste Theilchen einer von ihm getroffenen ebenen Fläche, und kann durch eine im geometrischen Mittelpunkt angreifende Kraft ersetzt werden, wenn diese Fläche senkrecht zu seiner Richtung sich befindet und wenn sie mindestens zwei Symmetrieaxen besitzt. Man kann dann wenigstens die Annahme gleicher Druckgrösse auf jedes Flächenelement machen, obschon auch dies nicht richtig ist, da der Druck auf die inneren Theile der Fläche stärker wirkt als auf die äusseren in Folge des gegen die Mitte immer mehr erschwerten Abflusses. Dieser bewirkt, dass sich die elastischen Lufttheilchen gegen die Mitte der Fläche unter immer stärkerem Druck befinden und somit stärker komprimirt werden.

Da aber nach allen Richtungen vom Mittelpunkt aus gleiche Abnahme der Drücke stattfindet und die algebraische Summe aller statischen Momente der einzelnen Drücke gleich

Null ist, so kann man sich die sämmtlichen Einzeldrücke ersetzt denken durch eine einzige Kraft, welche gleich ist der Summe sämmtlicher parallel wirkender Einzelkräfte und welche im Mittelpunkte angreift. Diese Kraft stellt eben die resultirende Mittelkraft oder die Gesammtresultante des Luftwiderstandes dar.

Besitzt eine ebene, senkrecht zum Luftwiderstand gestellte Fläche nur eine Symmetrieaxe, oder ist sie gar ganz unsymmetrisch gestaltet, so wirkt der Luftwiderstand verhältnissmässig stärker auf denjenigen Theil, welcher im Verhältniss weniger Randflächentheilchen besitzt. Denken wir uns nämlich die Luft in parallelen Strahlen auf eine Fläche auftreffen, so werden die Randstrahlen nur auf einer Seite an begleitende Strahlen grenzen und von diesen gehindert werden, sich nach ihrer Seite zu verbreiten. Nach der anderen Seite aber werden sie sich frei verbreiten können, und in Folge dessen eine weniger starke Kompression erleiden als die inneren Strahlen. Damit üben sie aber einen entsprechend geringeren Druck auf die getroffene Fläche aus. Die den Randstrahlen benachbarten Strahlen werden nicht ganz so leicht abfliessen, wie diese selbst, aber doch ihrerseits wiederum leichter als die noch weiter nach innen gelegenen. So steigert sich vom Rand nach der Mitte zu die Erschwerung des Abflusses der einzelnen Strahlen, damit aber ihre Kompression und dem entsprechend der Gegendruck, welchen sie auf der getroffenen Fläche erzeugen.

So verhält es sich bei jeder von senkrechten Luftstrahlen getroffenen Fläche, wenn aber eine Fläche schief zur Richtung des Luftstromes gestellt ist, so kommt noch der besondere Umstand hinzu, dass der Abfluss in der Richtung der Flächenneigung wesentlich erleichtert ist. Andererseits ist er in umgekehrter Richtung, bei steigender Neigung der Fläche entsprechend erschwert, indem die Lufttheilchen, um seitlich über den dem Luftstrom zugekehrten Rand abfliessen zu können, eine rückläufige Bewegung machen müssen, woran sie aber durch die nachströmenden gehindert werden. Der Punkt des stärksten Druckes liegt somit nicht mehr im geometrischen Mittelpunkt der Fläche, sondern er ist näher an den vorderen Rand gerückt. Und nicht nur der Punkt des

stärksten Druckes, sondern auch der Punkt, wo die Mittelkraft sämmtlicher Drücke angreift, wird damit nach der gleichen Richtung verschoben, indem auch die Gesammtheit der Drücke auf die vordere Flächenhälfte, wo nahezu alle Flächentheilchen unter starkem Druck stehen, die Gesammtheit der Drücke auf die hintere Flächenhälfte, wo ein grosser Theil der Flächentheilchen unter sehr geringem Drucke steht, überwiegt.

Je kleiner der Neigungswinkel der Fläche gegen die Bewegungsrichtung ist, desto stärker wird der Angriffspunkt in der genannten Richtung verschoben.

Daraus geht hervor, dass bei frei fallenden flachen Körpern überaus häufig die Richtung des Luftwiderstandes nicht zusammenfällt mit derjenigen der Schwerkraft, dass die verlängert gedachte Luftwiderstandsresultante somit nicht durch den Schwerpunkt geht. In diesem Falle können die beiden Einzelkräfte nicht mehr durch eine Kraft ersetzt werden und wir haben somit ein, eine Drehung des Körpers erzeugendes Kräftepaar.

Denkt man sich eine Ebene so durch den Schwerpunkt gelegt, dass die Angriffslinie der Mittelkraft des Luftwiderstandes und die Angriffslinie der Schwerkraft gleichzeitig in sie hineinfallen, so stellt dieselbe die Angriffsebene des Luftwiderstandes resp. die Angriffsebene von dessen Resultirender dar. Ein drehendes Kräftepaar strebt den betreffenden Körper um eine zu einer Angriffsebene senkrechte Axe, welche durch den Schwerpunkt geht, zu drehen und die Rotationsebene fällt mit der Angriffsebene zusammen.

Wie man bekanntlich alle im Schwerpunkt eines Körpers gleichzeitig angreifenden Kräfte durch eine einzige resultirende Kraft und mehrere Geschwindigkeiten durch eine Geschwindigkeit ersetzen kann, ebenso kann man auch verschiedene gleichzeitig wirksame drehende Kräftepaare durch ein einziges resultirendes Kräftepaar ersetzen, dessen Moment gleich ist der Momentensumme der in der gleichen Richtung wirksamen Komponenten aller Einzelkräfte. Umgekehrt kann man jede einfache Drehung als resultirende Drehung aus mehreren komponenten Einzeldrehungen um beliebig zu wählende Axen zusammengesetzt ansehen und so behandeln.

Es ist dies zur Erläuterung verwickelter Drehungsvorgänge häufig nothwendig oder wenigstens nützlich.

Was gekrümmte Flächen angeht, welche vom Luftwiderstand getroffen werden, so kann man sich diese aus unendlich kleinen ebenen Flächen zusammengesetzt denken und wenn diese um die, in die Bewegungsrichtung fallende Axe so angeordnet sind, dass einer jeden eine zweite um 180^0 entfernte, unter gleichem Winkel entgegengesetzt geneigte entspricht, so heben sich die horizontalen Komponenten der Einzeldrücke auf jedes Flächenelement gegenseitig auf und es bleiben nur die in die Bewegungsrichtung selbst fallenden Komponenten übrig, welche dann wiederum durch eine einzige in der Richtung der Axe selbst wirkende Mittelkraft ersetzt werden können. Auch in diesem Falle ist die algebraische Summe der statischen Momente somit Null und die resultirende Mittelkraft wird, verlängert gedacht, durch den Schwerpunkt der Fläche gehen. Es findet hier somit keine Drehung statt. Es trifft das für Rotationsflächen zu, deren Axe in die Bewegungsrichtung fällt. Derartige Flächen besitzen beliebig viele, die Axe in sich aufnehmende Symmetrieebenen. Übrigens genügt es, wenn die geneigten Flächenelemente sich um mindestens zwei solcher Symmetrieebenen ordnen, indem dann immer die beiderseits einer Symmetrieebene wirkenden Gesammtdrücke einander entgegenwirken und sich so aufheben.

Zerlegen wir die Gesammtheit aller Einzeldrücke, welche der Luftwiderstand auf einen beliebig gestalteten, fallenden oder überhaupt sich bewegenden Körper ausübt, in ihre senkrechten und horizontalen Komponenten oder besser in Komponenten, welche in die Bewegungsrichtung fallen und solche, welche senkrecht zu ihr gerichtet sind, so kommen nur die ersteren von beiden als direkt verzögernd zur Geltung, und zwar ob ihre Resultante durch den Schwerpunkt geht und durch eine Mittelkraft ersetzt werden kann, oder ob dies nicht der Fall ist und in Folge dessen gleichzeitig Drehungen erzeugt werden.

Alle senkrecht zur anfänglichen Bewegungsrichtung wirkenden Komponenten dagegen erzeugen, wenn sie sich nicht gegenseitig aufheben (im anderen Falle sind sie über-

haupt als verloren zu betrachten), seitlich gerichtete Geschwindigkeiten. Diese äussern sich in seitlich gerichteten Bewegungen und können entweder geradlinig oder krummlinig sein, je nachdem die verlängerte Mittelkraft durch den Schwerpunkt geht oder nicht. Diese seitlich gerichteten Geschwindigkeiten haben in der Luft (im Gegensatz zum luftleeren Raum) zum Theil direkte Bedeutung für die Fallverzögerung, zum mindesten aber eine indirekte, welche sehr wesentlich sein kann. Sie besteht in der bedeutenden Steigerung der lebendigen Kraft, welche Stabilität des Körpers in für Ausnützung seiner Flächen günstiger Stellung ermöglicht.

Letzteres tritt bei starker seitlicher Verschiebuug des Schwerpunktes flächenhaft entwickelter Organe ein, indem hier, entsprechend der Ungleichheit der Angriffsflächen beiderseits der Drehaxe, Drehkräfte von bedeutendem statischen Moment erzeugt werden. Die Beschleunigung der Rotationsgeschwindigkeit erfolgt bei dauernder Kraftwirkung nach denselben Gesetzen, wie die Beschleunigung einer geradlinigen Bewegung und es werden dadurch so bedeutende Zentrifugalkräfte entwickelt, dass sie im Stande sind, die Fläche des rotirenden Körpers in fast senkrechter Stellung zur Bewegungsrichtung zu erhalten.

Verhalten freidrehender Körper im luftleeren Raum. Hauptträgheitsaxen. Stabilität. Poinsot's Zentralellipsoid.

Analytisch kann man jede drehende Bewegung, auch wenn gleichzeitig ein Fortschreiten des Körpers, oder sogar ein Fortschreiten der Axe im Körper stattfindet, als einfache Drehung um eine, wenigstens zeitweise feste Axe behandeln, indem man die fortschreitende Bewegung gesondert betrachtet.

Frei drehende Körper drehen sich um ihren Schwerpunkt oder um Axen, welche durch den Schwerpunkt gehen, jedoch ist die Drehung nur um gewisse Axen eines jeden Körpers stabil, wogegen alle anderen Drehungen allein schon in Folge ungleich wirkender Zentrifugalkräfte ihre Axenlage ändern und allmählich in Drehungen um eine der sogenannten stabilen Drehaxen übergehen. Es sind dies die drei Hauptträgheitsaxen oder freien Axen, deren Lage durch die

Massenvertheilung der Körper gegeben ist, und zwar die beiden zu einander senkrechten Axen, in Bezug auf welche der Körper das grösste und kleinste Trägheitsmoment besitzt und die zu diesen beiden senkrechte Axe des mittleren Trägheitsmomentes.

Da das Trägheitsmoment eines Körpers in Bezug auf eine Axe die Summe der Produkte sämmtlicher Massentheilchen in das Quadrat ihres Abstandes von der betreffenden Axe ist, so geht daraus hervor, dass eine genaue Berechnung des Trägheitsmomentes der fliegenden Fortpflanzungsorgane unmöglich ist, indem einestheils die Gestalt derselben meist mehr oder weniger unregelmässig ist und anderntheils die Körper durchaus nicht homogen sind. Auch die sonstigen experimentellen Mittel, das Trägheitsmoment eines Körpers festzustellen, sind in vorliegendem Falle nicht wohl anwendbar und man muss sich für die natürlichen Objekte mit angenäherten Berechnungen oder am besten mit Übertragung von Berechnungsresultaten, welche an Modellen aus homogenem Material gewonnen wurden, begnügen.

Nach der Theorie der Drehung *) richtet sich die Axenlage in einem sich frei drehenden Körper nach dem Verhältniss der drei Hauptträgheitsaxen zu einander und zwar ist bei gleicher Drehgeschwindigkeit diejenige Axe die stabilste, welche das von der mittleren Hauptträgheitsaxe abweichendste Trägheitsmoment besitzt, ob dieses das grösste oder kleinste sei. Wenig beharrlich ist die Drehung um die Axe des mittleren Trägheitsmomentes und geringer äusserer Anstoss genügt schon, um hier eine Änderung der Axenlage im Körper hervorzubringen.

Wenn man aus den berechneten Trägheitsmomenten eines Körpers in Bezug auf die drei Hauptträgheitsaxen die Quadratwurzel auszieht und den reziproken Werth derselben mit einer beliebigen Konstanten multiplizirt, so geben die erhaltenen Zahlen, indem man sie als ebensoviele Maaseinheiten von dem Schwerpunkte als Ursprung eines rechtwinklichen Koordinatensystems aus auf den entsprechenden

*) Poinsot „Theorie nouvelle de la rotation des corps". Paris 1851.

Axen abträgt, die Haupthalbmesser eines darüber konstruirbaren Ellipsoides, des sog. Zentralellipsoides, von dessen Gestalt die Rotationsverhältnisse des frei drehenden Körpers abhängig sind. In einer homogenen Kugel ist das Zentralellipsoid selbst wieder eine Kugel und hier sind alle Axen gleich, in Folge dessen keine stabil. In nicht kugeligen Rotationskörpern ist nur eine einzige abweichende Hauptträgheitsaxe vorhanden, in Folge dessen ist auch nur diese einzige Axe bei der Drehung stabil.

Die Stabilität der Axen eines Körpers, dessen Zentralellipsoid drei ungleiche Hauptaxen besitzt, ergibt sich auf folgende Weise: Verbindet man alle Punkte der Fläche des Ellipsoids, deren Entfernung von dem Mittelpunkt gleich dem mittleren Halbmesser ist, so erhält man zwei Kreise, welche sich in der mittleren Hauptaxe schneiden. In der Richtung dieser Kreise durch das Ellipsoid gelegte Ebenen zerlegen den Körper desselben in 4 Keilstücke, deren Oberflächengrösse das Maass der Stabilität der durch ihren Scheitel gehenden Axe abgibt, vorausgesetzt, dass die Drehgeschwindigkeit um die betreffenden Axen die gleiche ist. Je nachdem die Pole der momentanen Axen eines sich drehenden Körpers diesseits oder jenseits jener Kreise die Oberfläche des Ellipsoides treffen, wird die Momentanaxe der einen oder andern der beiden stabilen Axen sich nähern, indem die betreffende stabile Axe die Momentanaxe in einer immer enger werdenden Kurve, einer Poinsot'schen Poloide umkreist. Ebenso kehrt die Rotation um eine stabile Axe, wenn auch durch ein fremdes Kräftepaar etwas abgelenkt, falls diese Ablenkung nicht zu bedeutend ist, immer wieder zu ihrer ursprünglichen Axe zurück.

Drehung in der Luft.

Das bisher vorgetragene gilt aber in vollem Umfange nur für Drehungen im luftleeren Raume. In einem widerstehenden Medium dagegen, speziell in der Luft, modifizirt sich die Sache nicht unwesentlich.

Zunächst wird der Luftwiderstand vor allem durch Reibung hemmend wirken, sobald jedoch Schieflage der getroffenen Flächen gegen ihn vorhanden ist, oder wenn

fortschreitende Bewegungen sich mit der Drehung verbinden, wie in unserem Falle immer, entstehen mannigfaltige neue drehende Kräfte, welche die Vorgänge sehr komplizirt gestalten.

Nach der Theorie der Drehung besitzt jeder Körper von ganz beliebiger Gestalt, ausser einigen wenigen, ganz regelmässigen Körpern, die oben besprochenen 3 freien oder Hauptträgheitsaxen, von welchen die kleinste und die grösste beharrlich sind. In der Luft nun sind diese der Theorie nach beharrlichen Axen häufig gar nicht beharrlich, indem die der Drehung entgegenwirkenden Widerstände oft mit weit bedeutenderem Kraftmoment angreifen als die bei den mässigen Rotationsgeschwindigkeiten und den im Verhältniss geringen Massen erzeugten Zentrifugalkräfte, mit welchen wir es hier zu thun haben. Die Stabilität der Axe eines in der Luft drehenden Körpers von so geringer Masse hängt am wesentlichsten von der Grösse des Luftwiderstandes ab und insofern können wir in unserem Falle mit einem gewissen Recht von „Axen grösseren und geringeren Luftwiderstandes“ sprechen. Übrigens werden ja die Drehungen selbst ebenfalls durch den Luftwiderstand hervorgerufen und manchmal erzeugt erst der Widerstand, welcher sich der anfänglichen Drehung entgegensetzt, die endgültige Art derselben.

Da die Drehungen der freien Körper um Schwerpunktsaxen und namentlich um Hauptträgheitsaxen stattfinden, so ist die Vertheilung der Flächen jederseits dieser Axen sehr wesentlich. Von ihr wird die Grösse des beiderseitigen Luftangriffs und damit auch die Richtung der Drehungen bedingt.

Axenbenennung.

Wenn ich in den folgenden Blättern von Axen rede, so sind, wenn nicht ausdrücklich anders bemerkt wird, immer nur durch den Schwerpunkt gehende Axen gemeint. Unter Längs-, Quer- und Vertikalaxe verstehe ich ebenso, wenn nicht ausdrücklich anders bemerkt ist, immer die entsprechenden drei Hauptträgheitsaxen der Körper, welche auch als z-, x- und y-Axe (vgl. die Figuren IX—XII,

Taf. I) bezeichnet werden sollen. Die Momentanaxe ist die jeden Augenblick ihre Lage im Körper wechselnde Axe bei Drehungen um einen Punkt, also um den Schwerpunkt. Sie ist die resultirende Axe oder die Axe der resultirenden Drehung, welche durch gleichzeitig in verschiedener Richtung auf einen Körper wirkende drehende Kräfte hervorgebracht wird, und welche ihren Ort im Körper, und unter Umständen auch im Raume wechselt.

Axen im Raum.

Von den bisher besprochenen Axen im Körper der drehenden Organe selbst müssen wir noch weitere Axen, welche bei der Betrachtung der Drehbewegungen zu berücksichtigen sind, unterscheiden. Es sind die für unsern Fall als unveränderlich anzusehenden Axen einer beliebigen Drehbewegung im Raume, mit welchen die momentane Drehaxe im Körper vollkommen oder wenigstens in einem Punkte zusammenfallen kann, aber nicht zusammenzufallen braucht. Wir benützen hiezu ein rechtwinkliches Koordinatensystem, dessen eine Axe im Raume senkrecht gedacht ist und werden somit bei den drehenden Bewegungen während des Falles ausschliesslich von im Raume senkrechten oder horizontalen Axen sprechen. Alle hier vorkommenden krummlinigen Bewegungen lassen sich am einfachsten auf solche Axen beziehen. Wenn im Gange vorliegender Untersuchung von Raumaxen die Rede ist, so ist das immer ausdrücklich bemerkt.

Grösse der wirksamen äusseren Kräfte. Schwere.

Was die Grösse dieser Kräfte anlangt, so verhält sich bekanntlich die Anziehungskraft der Erde entsprechend der Grösse der angezogenen Masse und die Geschwindigkeit der Fallbewegung steigt im luftleeren Raum mit dem Quadrat der Fallzeit, wie jede durch eine gleichmässig fortwirkende Kraft beschleunigte Bewegung in dem gleichen Verhältniss wächst. Ob die Körper grösseres oder geringeres spezifisches Gewicht haben, welche Gestalt immer sie besitzen mögen, alle fallen im luftleeren Raume gleich schnell lothrecht zur Erde nieder, indem, wenn auch die Masse zunimmt, die

Beschleunigung (= Kraft getheilt durch Masse) immer das gleiche Verhältniss zeigt.

In der atmosphärischen Luft dagegen ist die Fallgeschwindigkeit aller Körper bedeutend vermindert, ganz besonders aber nimmt sie ab mit dem abnehmenden spezifischen Gewicht derselben. Die Grösse der lebendigen Kraft, durch welche ein fallender Körper den Widerstand der Luft überwindet, wird nämlich bedingt durch die Grösse der Masse bei gleich bleibender Widerstandsfläche.

Die organischen Stoffe, mit welchen wir es bei den pflanzlichen Flugorganen zu thun haben, haben nun an sich kein hohes spezifisches Gewicht. Sie schwanken zwischen 1,2 und 1,7 im Verhältniss zu Wasser, so dass man sie im Durchschnitt zu 1,4 bis 1,5 annehmen kann, wenn sie keine luftgefüllten Hohlräume im Inneren besitzen. Es ist dies für einen Theil der staubförmigen Flugorgane, welche nur aus einzelnen kleinen Zellen ohne weitere äussere Anhänge bestehen, wie die Spaltpilze oder viele Sporen- oder Pollenkörner, zulässig. In anderen und zwar den meisten Fällen trifft dies aber nicht zu, sondern es sind fast immer luftgefüllte Hohlräume in grösserer oder geringerer Zahl in sehr feiner Vertheilung oder auch als gröbere Zwischenräume vorhanden. Manche staubförmige einzellige Körper, wie z. B. die Pollenkörner unserer Nadelholzarten besitzen so luftgefüllte blasenförmige Anhänge, welche ihr spezifisches Gesammtgewicht sehr wesentlich herabsetzen. Die hierhergehörigen Samen und Früchte haben fast ohne Ausnahme Hüllen und Fluganhängsel, welche ein geringeres spezifisches Gewicht als das angegebene besitzen. Nach dem Eintritt der Reife trocknen sie aus und es vermindert sich das Gewicht dann ganz wesentlich, indem an Stelle des in den Zellen enthaltenen Wassers, welches verdunstet, Luft tritt. Sehr viele feine Haaranhänge, z. B. diejenigen der Asklepiadeensamen bilden lange sehr feine Röhren mit sehr geringer Wandstärke, welche aber für den kurzdauernden Gebrauch des Organs genügt. Obgleich die Stoffe, aus denen z. B. der Flügel der Traubenahornfrucht besteht, c. 1,5 sp. Gew. besitzen, betrug das spezifische Gewicht der ganzen Flügel, bei einer grösseren Zahl, welche ich darauf geprüft habe,

nur c. 0,46. Ebenso sind die Zellen der bandförmigen Samenhaare der Bromeliacee Pitcairnia imbricata ausnahmslos luftgefüllt. Das wirkliche spezifische Gewicht der ganzen Organe ist häufig nur sehr schwierig oder gar nicht nachzuweisen, bleibt aber immer mehr oder weniger hinter 1,5 zurück. Ich will dabei noch gar nicht von den Formen mit reiner Haarhülle reden, wie sie manche kugelige Compositenachenen darstellen. Deren spezifisches Gewicht ist, wenn man die Begrenzungsfläche der Haarhülle als Begrenzungsfläche des ganzen Organes annimmt, ganz ausserordentlich vermindert, das der Achenen von Cynara Scolymus beispielsweise um nicht weniger als das 765fache. Es beträgt im Verhältniss zum Wasser nämlich nicht mehr als 0,00196 d. h. nur um $^1/_3$ mehr als das der atmosphärischen Luft.

Immerhin beträgt das spezifische Gewicht der Luft doch noch weniger — bekanntlich bei 0^0 und 760 mm Barometerstand 0,001293 — und alle pflanzlichen Flugkörper, auch die leichtesten, sinken ohne Ausnahme, wenn auch mit verminderter Fallgeschwindigkeit zu Boden.

Grösse des Luftwiderstandes.

Theoretisch wächst die Grösse des Luftwiderstandes mit dem Quadrate der Geschwindigkeit, wie aus folgender Überlegung hervorgeht: Bekanntlich ist die von einer Kraft geleistete mechanische Arbeit (= Kraft mal Weg) gleich der Summe der überwundenen Widerstände, und ihre Grösse wird ausgedrückt durch die Grösse der durch sie erzeugten lebendigen Kraft oder kinetischen Energie

$$L = \frac{m v^2}{2}$$

in welcher m die bewegte Masse und v ihre durch die Kraft erzeugte Geschwindigkeit in der Einheit der Zeit darstellt. Um die Luftmasse $\frac{\gamma}{g}$ (Masse ist bekanntlich Gewicht eines Körpers, dividirt durch die Beschleunigung der Schwere g; γ stelle das Gewicht einer Volumeneinheit Luft dar) mit seiner eigenen Geschwindigkeit vorwärts zu schieben, respektive ihr diese Geschwindigkeit zu ertheilen, was der Übertrag-

ung der lebendigen Kraft $\frac{m v^2}{2}$ entspricht, muss ein sich bewegender Körper die Arbeit $\frac{\gamma}{g} \cdot \frac{v^2}{2}$ leisten, oder $\gamma \frac{v^2}{2g}$.

Die Summe der geleisteten Arbeit ist immer gleich der Summe der überwundenen Widerstände, also ist mit dem Ausdruck $\gamma \frac{v^2}{2g}$ gleichzeitig der Widerstand gegeben, welchen die Luft einem sich in ihr bewegenden Körper entgegensetzt, und die Grösse dieses Widerstandes ist für ein bestimmtes γ, da 2 g für denselben Ort konstant ist, proportional der Grösse v^2, also dem Quadrat der relativen Geschwindigkeit. Freilich ist dies nur theoretisch der Fall. In Wirklichkeit steigt die Grösse des Luftwiderstandes für die gleiche Widerstandsfläche in etwas anderem Verhältniss und zwar bei ganz langsamer Bewegung in einfachem Verhältniss mit der Geschwindigkeit, bei mittleren Geschwindigkeiten mit dem Quadrat dieser und für grössere Geschwindigkeiten in noch stärkerem Masse. Es liegt dies an dem Umstande, dass bei grösserer Geschwindigkeit die Luft vor dem Körper durch den Druck verdichtet wird und seitlich abfliessen muss, hinter ihm aber durch Saugen verdünnt wird. Im übrigen wächst der Widerstand, abgesehen von kleinsten Flächen, mit dem Wachsthum der wirksamen Fläche in etwas stärkerem Verhältniss.

Ein besonderes Verhalten zeigen, auch bei gleicher Geschwindigkeit, geneigte Flächen. Es geht dies aus folgender Ueberlegung hervor: Zunächst bedingt die Grösse der Projektionsfläche immer die Grösse des Querschnittes eines auf eine beliebige Fläche auftreffenden Stromes und damit auch die Grösse des Gesammtdruckes, welchem sie ausgesetzt ist. Diese Projektionsfläche ist immer gleich dem Produkt des Inhaltes der getroffenen Fläche in den Kosinus des Winkels, welchen letztere mit ihrer zur Bewegungsrichtung senkrechten Projektion einschliesst. Bedeutet in der Figur 1 (Taf. IV) die Linie D E den Querschnitt einer unter dem Winkel β zum Horizont geneigten ebenen Fläche und stellt A B die Richtung des vom Luftwiderstand ausgeübten Druckes auf diese Fläche dar, so gibt die punktirte Linie D F den Querdurchmesser des

auf die Fläche DE treffenden Luftstromes an. Zugleich gibt DF im Verhältniss zu DE die Grösse der genannten Projektionsfläche an. DF ist aber gleichzeitig DE cos β.

Im Übrigen wäre aber theoretisch die Wirkung der Geschwindigkeit des auftreffenden Luftstroms auf eine geneigte Fläche nicht gleich der Grösse dieser Geschwindigkeit zu setzen, sondern dieselbe müsste geringer sein. Denn denken wir uns die Grösse und Richtung der Geschwindigkeit wiederum durch die Linie AB (Fig. 1) dargestellt, welche die geneigte Fläche DE trifft, so können wir uns dieselbe in zwei Komponenten zerlegt denken, in eine, welche gleich ist der Seite DB = AB cos α des Parallelogramms ADBC und eine zweite gleich der Seite BC = AB cos β = AB sin α (da α und β Komplementwinkel darstellen). Die erstere Geschwindigkeitskomponente fällt aber mit der Richtung der Ebene DE selbst zusammen und der auftreffende Luftstrom würde dem entsprechend mit der Geschwindigkeit AB cos α längs der Ebene fortgleitend, Reibung, aber keinen Druck ausüben, die zweite Komponente dagegen drückt mit der Geschwindigkeit AB sin α normal auf die Fläche und stellt die wirkliche Grösse des ausgeübten Druckes dar. Anstatt der Grösse AB wäre also nur die Grösse AB sin α in etwaige Berechnungen einzuführen. Nachdem nun aber der Luftwiderstand, wie schon ausgeführt, mit dem Quadrat der Geschwindigkeit wächst, so müsste, wenn v. sin α die jeweilige wirksame Geschwindigkeitskomponente für eine bewegte schiefe Fläche darstellt, diese Grösse in dem Verhältniss von

$$(v. \sin \alpha)^2 = v^2. \sin^2 \alpha$$

wachsen. Es wären nach dieser Entwickelung für schief gestellte Flächen die Grössen f. cos β und v^2. $\sin^2 \alpha$ (oder v^2. $\cos^2 \beta$) anstatt f und v in die Rechnung einzuführen, wenn f die Grösse der Fläche und v die Geschwindigkeit des Luftstromes überhaupt bezeichnet.

Empirisch ist jedoch dies nicht richtig, vielmehr wächst thatsächlich die Geschwindigkeit bei schief gestellten Flächen näher dem einfachen Verhältniss v^2. sin α oder v^2. cos β und für die Gesammtfläche näher demjenigen f. v^2. cos β. Dies scheint für eine bestimmte Neigung, nämlich für $\beta = 30^0$ also $\alpha = 60^0$ thatsächlich zuzutreffen, wogegen bei ab-

nehmendem β die Grösse rascher anwächst und bei zunehmendem β rascher abnimmt, als der zugehörige Kosinus. Immerhin gibt das einfache Kosinusverhältniss den relativ nächstkommenden wirklichen Werth.

Empirisch entspricht die Zunahme des Widerstandes im quadratischen Verhältniss annähernd für mittlere Geschwindigkeiten und es fällt das Problem der Fallbewegung eines nicht zu schweren Körpers, wie diejenigen sind, mit welchen wir es hier zu thun haben, demnach mit dem Problem eines sich bewegenden Körpers oder materiellen Punktes zusammen, auf welchen in einander entgegengesetzter Richtung zwei Beschleunigungen einwirken. *)

Wenn der Punkt die Anfangsgeschwindigkeit Null besitzt, so verhält sich die Sache in folgender Weise:

Die Geschwindigkeit des fallenden Körpers sei v, der Weg = s, seine wirkliche Beschleunigung = φ und die Beschleunigung des Luftwiderstandes = ψ. Es ist dann immer $\psi = \varepsilon v^2$. Wenn nun diejenige Geschwindigkeit, bei welcher ψ gleich der Fallbeschleunigung im luftleeren Raum, also = g wird, mit k bezeichnet wird, so ist

$$g = \varepsilon k^2$$

$$\text{also } \varepsilon = \frac{g}{k^2}$$

Dieser Werth in die obige Gleichung eingeführt, gibt

$$\psi = \frac{g}{k^2} \cdot v^2$$

Nachdem aber immer

$$\varphi = g - \psi$$

so bekommen wir bei Einfügung des Werthes für ψ und Vereinfachung der Gleichung

$$\varphi = g \cdot \frac{k^2 - v^2}{k^2}$$

Ausserdem haben wir die aus der Mechanik bekannten Gleichungen zwischen den Grössen φ, v, s und t:

$$v = \frac{ds}{dt}$$

$$\text{und } \varphi = \frac{dv}{dt}$$

*) Schell „Theorie der Bewegung und der Kräfte" pag. 223.

Aus diesen letzteren drei Gleichungen ergeben sich schliesslich die Grössen für t, v und s:

$$t = \frac{k}{2g} l \cdot \frac{k + v}{k - v}$$

$$v = k \cdot \frac{e^{\frac{g}{k}t} - e^{-\frac{g}{k}t}}{e^{\frac{g}{k}t} + e^{-\frac{g}{k}t}} = k \cdot \text{tang hyp} \frac{gt}{k}$$

$$s = \frac{k^2}{2g} l \cdot \frac{k^2}{k^2 - v^2}$$

aus welchen man für jeden Moment die Geschwindigkeit ersehen kann, wenn man den Koeffizienten ε kennt. Dieser stellt eine Erfahrungsgrösse dar, die sich aus dem spezifischen Gewicht des Körpers und der Grösse seiner Widerstandsfläche berechnen lässt.

In der vorletzten Gleichung bedeutet e die bekannte Zahl 2,7182 . . . . ; die Grösse $e^{-\frac{g}{k}t}$ nähert sich aber mit wachsender Zeit t der Null, somit nähert sich auch die Geschwindigkeit der Grösse k als Grenze. Da nun k eine konstante Grösse darstellt, so muss die Bewegung immer gleichförmiger werden. Aber erst wenn $\varphi = g - \psi = o$ wird, würde wirklich gleichförmige Geschwindigkeit erreicht werden und da dies nie eintritt, so findet nur eine asymptotische Annäherung statt. Also wird ein unter diesen zwei Beschleunigungen sich bewegender Körper nie eine ganz gleichförmige Bewegung annehmen, jedoch wird allmählich die Geschwindigkeitszunahme so unmessbar klein werden, dass man die Bewegung als gleichförmig betrachten kann. Wenn nun auch die Bewegung eines in der Luft fallenden Körpers gegenüber dieser theoretischen Entwicklung gewisse Modifikationen erleidet, so ist doch das Wesen der Bewegung selbst damit am besten charakterisirt.

Wie weiter festgestellt wurde, steht die Grösse des Luftwiderstandes gegen bewegte Körper in direktem Verhältniss zu der Dichte des betreffenden Mediums und ist beeinflusst durch die Gestalt des sich bewegenden Gegenstandes, da erstens die parallelen Flüssigkeitsstrahlen, welche seine Oberfläche treffen, wie schon näher ausgeführt, je nach der Gestalt des letzteren mehr oder weniger leicht abfliessen

können und da zweitens je nach der Grösse der seitlichen Flächen stärkere oder schwächere Reibung stattfindet. Wie die keilförmige Gestalt eines schneidenden Instruments das Eindringen in feste Körper erleichtert, so verhält es sich auch mit dem Eindringen keilförmig gestalteter Körper in Flüssigkeiten. Wenn also der Widerstand möglichst vergrössert werden soll, was für passiv bewegte Körper, wie die pflanzlichen Flugorgane, oberstes Prinzip ist, so muss für die betreffenden Körper eine möglichst stumpfe Form gewählt, die dem Luftwiderstande entgegenzusetzende Fläche muss möglichst vergrössert werden. Was die verschiedenen Flächen anlangt, so haben sich auf empirischem Wege einige Verhältnisszahlen herausgestellt, welche, in die Formeln für die Widerstandsgrösse eingeführt, wenigstens ziemlich annähernd richtige Resultate geben. Für beliebige Geschwindigkeiten ist das Problem des Luftwiderstandes ein höchst verwickeltes und bis heute noch nicht gelöst. Für mittlere Geschwindigkeiten, wie sie beim Fall leichter Körper in der Luft vorkommen, entspricht das Verhältniss nach dem Quadrat der Geschwindigkeit annähernd der Wirklichkeit, wenn die erwähnten Erfahrungskoeffizienten für die Gestalt der Widerstandsflächen in die Formeln eingeführt werden.

Wenn wir nun zu der für uns wichtigen Frage kommen, wann wird ein Körper von der Luft getragen, so ist die Antwort darauf im bisherigen bereits gegeben. Wenn die Geschwindigkeit eines senkrecht aufsteigenden Luftstroms oder seine senkrecht aufsteigende Geschwindigkeitskomponente so gross ist, wie seine grösste gleichförmige Fallgeschwindigkeit, so kann der Körper nicht zur Erde sinken. Ein sehr einfacher Weg, zur theoretischen Erkenntniss des grössten Luftwiderstandes, welchen ein fallender Körper erfährt und damit auch ohne direkte Beobachtung zur Kenntniss seiner grössten Fallgeschwindigkeit zu gelangen, welcher ein entsprechender Luftstrom das Gleichgewicht hält, ergibt sich aus der Grösse der mechanischen Arbeit, welche er durch sein Gewicht zu leisten im Stande ist.

Wir hatten früher gesehen, dass die geleistete Arbeit des in der Luft fallenden Körpers gleich seiner durch den Fall erzeugten lebendigen Kraft

$$L = \gamma \frac{v^2}{2g}$$

ist, in welcher Gleichung γ das Gewicht der Volumeneinheit Luft darstellt. Denken wir uns nun den Körper durch die Fallbeschleunigung immer schneller fallen, so wird schliesslich der Ausdruck $\frac{v^2}{2g}$, welcher bekanntlich nach dem Fallgesetze den zurückgelegten Weg oder die Fallhöhe h für die bestimmte Geschwindigkeit v im luftleeren Raume anzeigt, so gross werden, dass die Luftmasse, welche durch die Bewegung verdrängt wird, gleich wird der Masse des fallenden Körpers. Dieser lässt sich bei gleichem Querschnitt mit der verdrängten Luftsäule (was beim Fall eines Körpers in der Luft immer zutrifft) durch die Zahl $\gamma_1 h_1$ bezeichnen, worin γ_1 das Gewicht der Volumeneinheit des Körpers und h_1 dessen mittlere Höhe bedeutet. Wir können nunmehr setzen:

$$L = \gamma \frac{v^2}{2g} = \gamma_1 h_1$$

denn wenn die geleistete Arbeit durch den einen Ausdruck bezeichnet wird, muss sie auch durch den andern ihm gleichwerthigen ausgedrückt werden können. Setzen wir die beiden letzteren Ausdrücke allein einander gleich, so bekommen wir

$$\gamma_1 h_1 = \gamma \frac{v^2}{2g}$$

und multipliziren wir nun beide Seiten der Gleichung mit der Grösse f, welche den nach unserer Voraussetzung gleichen Querschnitt des fallenden Körpers wie der verdrängten Luftsäule bezeichnet, so bekommen wir

$$f\gamma_1 h_1 = f\gamma \frac{v^2}{2g};$$

der Ausdruck links $f\gamma_1 h_1$ ist aber nichts anderes, als das Gesammtgewicht des fallenden Körpers ($f h_1$ = Volumen), gerade so wie der Ausdruck rechts das Gesammtgewicht der verdrängten Luftsäule vorstellt. Wir können somit, da der geleistete Widerstand w gleich dem Gewichte ist, mit welchem der Körper auf die Luftsäule drückt, auch setzen

$$w = \gamma f \frac{v^2}{2g}$$

und haben damit eine Gleichung, welche uns ein einheitliches Mass für die Bestimmung der darin vorkommenden wechselnden Grössen und die Leistungsfähigkeit der Flugorgane an die Hand gibt. Für γ ist der Werth 1,293 grm gleich dem Gewichte eines Liters Luft, für g die Grösse der Fallbeschleunigung gleich 9,81 m einzuführen. v bedeutet die Geschwindigkeit pro Sekunde.

Grösse der Erfahrungskoeffizienten für verschiedene Widerstandsflächen.

Für die verschiedenen Flächen, welche den Stoss der Luft auszuhalten haben, sind aber noch die bereits erwähnten besonderen Erfahrungskoeffizienten in die Formel einzuführen.

So ist der Widerstandskoeffizient für einen in der Richtung seiner Axe sich bewegenden Zylinder (also für die ebene Kreisfläche, welche seine Basis bildet) $^1/_3$, für einen rechtwinklich zu seiner Axe sich bewegenden Zylinder dagegen $^2/_3$, für eine Kugel $^1/_2$, für eine mit ihrer Konkavität voraus sich bewegende an beiden Enden offene halbe Zylinderfläche annähernd 2 und für eine ebensolche hohle Halbkugel $^5/_2$*). Es gilt die obige Formel mit diesen Koeffizienten aber nur dann, wenn die Körper eine in der Bewegungsrichtung nicht allzu bedeutende Länge besitzen, wenn nämlich letztere nicht mehr als 4—6mal den mittleren Querdurchmesser übersteigt und wenn die konkaven Körper geringe Wanddicke besitzen. Im andern Falle wird die seitliche parallele Reibung so bedeutend, dass sie den Widerstand merklich erhöht. Wird der Erfahrungskoeffizient für die Oberflächengestalt mit ζ bezeichnet, so heisst nunmehr die Formel:

$$w = \zeta \gamma f \frac{v^2}{2g}$$

Nach einigen Vorversuchen sind die Berechnungsresultate bei richtiger Bestimmung des Koeffizienten ζ, was freilich nur bei regelmässig gestalteten Körpern möglich ist, bis auf $^1/_9$—$^1/_{11}$ genau. Je grösser nun eine Widerstandsfläche bei gleich bleibender Masse eines Körpers ist, desto mehr

*) S. Ritter „Lehrbuch der technischen Mechanik“ p. 750.

kann der Luftwiderstand ausgenützt werden und bei desto kleinerer Geschwindigkeit wird die Grenze der Fallbeschleunigung erreicht, aber hier ergibt sich nun eine Grenze für die Flächenausnützung in der Bedingung, dass sich die Fläche beim freien Falle auch in günstiger Richtung zum widerstehenden Mittel stellen und darin erhalten muss. Es kann eine sehr bedeutende Flächenvergrösserung stattfinden, ohne dass dieser Bedingung genügt ist, und ohne dass grössere Vortheile erreicht werden. Ein Stab zum Beispiel, welcher seinen Schwerpunkt in der Nähe des einen Endes besitzt, wird gegenüber einem mehr isodiametrischen Körper, speziell einer Kugel von derselben Masse, diese Oberflächenvergrösserung nicht ausnützen können, indem er sich mit seiner Längsaxe in die Richtung seiner Bewegung stellen wird und die vermehrte seitliche Reibung den Verlust an Querschnittsfläche nicht ersetzen kann.

Dass dies geschieht, dazu ist entweder eine bestimmte Gestalt der Widerstandsfläche oder wenigstens eine bestimmte Lage des Schwerpunktes nöthig, welche dem Körper beim Fall eine stabile Lage gibt, oder endlich, und das sind die interessantesten Fälle, die dauernd günstigste Stellung der vergrösserten Fläche, die Stabilisirung des Organes in der entsprechenden Lage, wird mittelst einer besonderen Drehbewegung erreicht, welche dem Organ durch den Luftwiderstand gleich im Anfang seiner Bewegung aufgezwungen wird.

Unter den vorhin aufgeführten Erfahrungskoeffizienten für die verschiedenen Widerstandsflächen ist der höchste der für die konkave Kugelfläche. Gleichwohl sehen wir aber diese Widerstandsfläche in einigermassen reiner Form meines Wissens nirgends bei den pflanzlichen Flugorganen auftreten. Lassen wir eine Halbkugelschale mit der konkaven Fläche nach abwärts gerichtet fallen, so kehrt sie sich sofort um, wenn wir nicht ihren untersten Rand durch angehängtes Gewicht ganz bedeutend belasten und damit den Schwerpunkt, welcher bei einer halbkugeligen Fläche bekanntlich in der Mitte ihrer Höhe sich befindet, tief herab unter die Mündung der Höhlung verlegen.

Bei vollkommen horizontaler Stellung einer, ihre Kon-

kavität nach abwärts richtenden Halbkugelschale befindet sich der Körper im labilen Gleichgewicht. Wenn die Lage des Körpers in Bezug auf eine horizontale Schwerpunktsaxe sich aber nur im Geringsten ändert, so entstehen sofort drehende Kräfte, welche nicht gegensinnig kompensirend, sondern gleichsinnig mit der ersten kleinen Drehung wirken. Die Momente dieser Drehungen wachsen fortwährend und der Körper wird umgestürzt. Die Drehwirkung entsteht dadurch, dass bei Neigung der Halbkugel die Resultante des Luftwiderstandes nicht mehr durch den Schwerpunkt geht, sondern an diesem vorbei, indem im wesentlichen nur mehr der direkt vom Luftwiderstand getroffene, in der Projektion elliptische Theil der Hohlfläche wirksam ist und dessen geometrischer Mittelpunkt (da die Fläche zwei Symmetrieaxen besitzt) den Angriffspunkt der Resultirenden des Luftwiderstandes darstellt. Der geringe Einfluss der nicht direkt getroffenen abwärts geneigten Fläche, welche durch Erschwerung des Luftabflusses nach der geneigten Seite wirkt, genügt nicht, um das entgegenwirkende Drehmoment zu kompensiren. Je tiefer nun der Schwerpunkt herab verlegt wird, um so stabiler wird die Stellung einer solchen Widerstandsfläche, aber wirklich stabil wird sie nur, wenn er ganz ausserhalb der Höhlung sich befindet.

Ähnlich gestaltete Körper, wie manche Samen und Früchte, stürzen um so leichter um, als die Gestalt der betreffenden Körper meist durch dünnhäutige Flügel erreicht und der Mittelpunkt der Wölbung von dem Hauptorgan, der Nuss, eingenommen wird. Hier liegt also der Schwerpunkt noch höher und dafür stellt sich dann in umgekehrter Lage durch entsprechende Tieflage des Schwerpunktes um so grössere Stabilität her. Es tritt hier der umgekehrte Fall ein, wovon wir später bei den betreffenden Körpern reden werden. Übrigens kommen Andeutungen von konkaven Widerstandsflächen vor, beispielsweise bei manchen fallschirmartigen Haarkronen, auch bei den sehr eigenthümlich gestalteten Samen von Catalpa bignonioides, welche letztere aber freilich noch andere Einrichtungen, die eine gewisse Stabilität verbürgen, besitzen.

Eine wirklich konkave Widerstandsfläche, freilich nur

ausnahmsweise als solche verwendet, kommt bei den Früchten von Carpinus betulus vor, deren einhüllende Cupula dieselbe darstellt. Es wird davon und über die Möglichkeit ihrer Verwendung bei der speziellen Betrachtung die Rede sein.

Sollte der Fallschirm in seiner typischen Gestalt mit ausgeprägter konkaver Widerstandsfläche bei pflanzlichen Organen sich finden, so dürfte er wohl am ehesten in Gestalt von ganzen Fruchtständen mit persistirenden Deck- oder Vorblättern und stark verlängerten Fruchtstielen vorkommen, analog der Ausbildung des Lindenfruchtstandes.

Fallende Körper im Winde.

Es bleibt uns nunmehr noch das Verhalten fallender Körper im Winde, wenigstens prinzipiell, zu betrachten. Dieses Verhalten, speziell zu horizontalen Luftströmungen, stellt gewissermassen den umgekehrten Fall dar, wie ihn ungestört fallende Körper darbieten. Zu einem horizontalen Luftstrom verhält sich ein senkrecht fallender Körper wie ein ruhender. Jede horizontale Luftströmung wird einen fallenden Körper von seiner senkrechten Bahn ablenken und zwar wird die Grösse der Ablenkung in geradem Verhältniss zu der Geschwindigkeit der Strömung und zur Angriffsfläche, und im umgekehrten Verhältniss zu seiner Masse stehen. Dabei ist aber vorausgesetzt, dass der Körper in jeder Angriffsrichtung eine gleich grosse und gleichgestaltete Oberfläche darbiete, oder dass er kugelförmig sei.

Um die Bahn, welche der Körper zurücklegt, zu verstehen, müssen wir die Art der Wirkung der beiden Kräfte uns klar machen.

Es unterliege im luftleeren Raum ein Körper gleichzeitig zwei zu einander senkrecht gerichteten Geschwindigkeiten. Die eine sei in Folge der Einwirkung einer horizontal wirkenden Momentankraft eine gleichförmige horizontale, und die andere eine durch dauernde Wirkung einer sich gleichbleibenden Kraft erzeugte, gleichförmig beschleunigte, lothrecht nach abwärts gerichtete. Die Bahn, welche der Körper unter solchen Bedingungen zurücklegt, lässt sich be-

kanntlich durch die Gleichung $y^2 = 2px$ als eine parabolische charakterisiren.

In der Luft verhält sich die Sache aber anders. Zunächst ist die Fallbewegung keine gleichförmig beschleunigte, sondern eine Bewegung von zwar bis zu einem gewissen Momente zunehmender Geschwindigkeit, aber auch von bis zu dem gleichen Momente abnehmender Beschleunigung. Von diesem Momente an bleibt sie gleichförmig. Es ist also gerade so, als ob eine abnehmende Kraft, welche schliesslich gleich Null wird, im luftleeren Raum auf den Körper gewirkt hätte.

Die Horizontalbewegung ihrerseits wird durch horizontal strömende Luft erzeugt, welche man sich sowohl stossartig als Momentankraft wirkend, wie auch mit zunehmender oder abnehmender Geschwindigkeit, oder endlich mit gleichförmiger Stromgeschwindigkeit einwirkend vorstellen kann.

Nehmen wir zunächst an, dass sie stossweise wirke, so wäre damit das ballistische Problem gegeben, welches unter der Voraussetzung der Richtigkeit des quadratischen Widerstandsgesetzes eine Bahnkurve ergibt, welche uns hier nicht weiter berührt. Prinzipiell wichtig für uns ist dagegen die Frage nach dem Verhalten eines fallenden Körpers bei gleichförmiger Stromgeschwindigkeit des Windes.

Wie die senkrechte Fallgeschwindigkeit des Körpers in der Luft nach einer gewissen Zeit eine gleichförmige wird, so ist dies auch mit seiner horizontalen Geschwindigkeit der Fall. Dieselbe muss allmählig die Geschwindigkeit des Luftstromes selbst erreichen. Zunächst ist selbstverständlich, dass die Horizontalgeschwindigkeit und die Vertikalgeschwindigkeit, sobald sie gleichförmig geworden sind, eine geradlinige Resultirende, entsprechend dem Parallelogramm der Geschwindigkeiten erzeugen.

Bevor gleichförmige Geschwindigkeit beider Componenten eintritt, verhält sich die Sache aber folgendermassen: Bei dem Fall muss anfangs die (vertikale) Geschwindigkeit am stärksten wachsen, da hier bei der relativ langsamen Bewegung der Luftwiderstand am geringsten ist. Mit zunehmendem Widerstand wächst sie immer langsamer, bis sie schliesslich gleichförmig wird. Also die Geschwin-

digkeitszunahme oder Beschleunigung nimmt dauernd ab, bis sie Null geworden ist.

Die Horizontalbewegung wird durch die auf den Körper treffende horizontal strömende Luft erzeugt. Die Grösse der Bewegung richtet sich also in jedem Augenblick nach der Grösse des erzeugten Luftwiderstandes. Der Körper befindet sich im ersten Moment des Fallens gegenüber dem horizontalen Luftstrome in dem Zustand absoluter Ruhe, in Folge dessen muss die Luft mit ihrer ganzen Geschwindigkeit zur Wirkung gelangen und dem Körper die für die betreffende Windstärke grösstmögliche Beschleunigung ertheilen. Mit dem Beginne und der allmähligen Zunahme der horizontalen Geschwindigkeit des Körpers wird jedoch der Unterschied zwischen den beiden Geschwindigkeiten immer kleiner werden und in Folge dessen auch die wirksame Kraft und die ertheilte Beschleunigung, bis schliesslich der Körper die gleiche horizontale Geschwindigkeit wie der Luftstrom selbst angenommen hat.

Wir haben somit nach beiden Richtungen abnehmende Grösse der Beschleunigung und können bei grösseren Wegstrecken für eine ohnehin nur approximativ mögliche Berechnung ohne allzu grossen Fehler die resultirenden Bahnen als gerade annehmen. Die Bahn würde demnach dargestellt durch die Diagonale eines Parallelogramms, dessen Höhe durch den in senkrechter und dessen Basis durch den in horizontaler Richtung in gleicher Zeit zurückgelegten Weg gegeben wäre. Letzterer Weg entspricht dem Verhältniss der Geschwindigkeit des Windes zu der grössten Fallgeschwindigkeit des betreffenden Körpers in der Luft, so dass beispielsweise bei einer Windgeschwindigkeit, welche eine die Fallgeschwindigkeit um's Doppelte übertreffende Horizontalgeschwindigkeit erzeugt, in horizontaler Richtung der doppelte Weg zurückgelegt wird wie in vertikaler.

Macht die Windrichtung zur Fallrichtung einen schiefen Winkel, so ist natürlich auch dieser in die betreffende Gleichung einzuführen und es gilt dann, wenn α dieser Winkel, R die resultirende Diagonale und S und S_1 die beiden zusammenwirkenden Geschwindigkeiten sind, die bekannte, aus dem Kosinussatze hervorgehende Gleichung

$$R^2 = S^2 + S_1^2 - 2SS_1 . \cos \alpha.$$

Alles gesagte gilt selbstverständlich nur für gleichförmige Stromgeschwindigkeit der Winde. Sobald die Luftbewegung dagegen ungleichförmig wird, wie dies in der Natur thatsächlich meist der Fall ist, entstehen Bahnen, welche aus mannigfaltig gekrümmten Kurven von bald aufwärts bald abwärts gerichteter Konkavität zusammengesetzt sind. Bei zunehmender Windstärke richtet sich die Konkavität nach oben, bei abnehmender nach unten.

Nicht isodiametrisch gestaltete Körper bewegen sich in Bahnen, welche im einfachsten Fall von der Grösse und Gestalt der Angriffsfläche für die unter beliebigem Winkel zu einander wirkenden Luftwiderstände abhängen. Bei schon in ruhender Luft krummlinigen Fallbahnen, wie wir sie kennen lernen werden, sowie bei den um eine ihrer Hauptträgheitsaxen rotirenden Körpern wird die Bewegung dagegen eine im allerhöchsten Grade komplizirte.

Was die in der Natur vorkommenden Windgeschwindigkeiten anlangt, so sind diese sehr verschieden. Nach der Tabelle von Jelinek*) werden 10 Grade unterschieden, welche von 1—40 m auf die Sekunde ansteigen. Letztere Geschwindigkeit kommt aber wohl nur äusserst selten, auf dem Meere oder in den Küstengegenden vor. In Südbayern zum Beispiel sind Winde, welche über 30 m Geschwindigkeit besitzen, nicht beobachtet.**)

*) Anleitung zur Anstellung meteorologischer Beobachtungen, 2. Aufl. Wien 1876.

**) Nach mündlicher Mittheilung des Herrn Dr. Lang, Direktor der k. b. meteorologischen Centralstation.

II. Abschnitt.

Untersuchungsmethoden.

Allgemein angewandte Methoden.

Die Prüfung der hier behandelten Vorgänge wurde im wesentlichen durch Fallversuche vorgenommen. Es wurden solche sowohl mit den natürlichen Objekten angestellt, als auch mit vergrösserten Modellen, welche aus Papier, Kork, Holz, Siegellack und Gummi verfertigt waren. Modelle zu verfertigen ist sehr häufig nöthig, indem die Einzelheiten der Drehungen oder sonstigen Bewegungen, welche die fallenden natürlichen Flugorgane machen, in Folge der relativen Kleinheit derselben nicht mehr wahrgenommen werden können. Stellt man sich dagegen bedeutend vergrösserte Modelle dar, so ist direkte Beobachtung in der Regel möglich, namentlich dann, wenn man durch verschiedenartige kräftige Färbung auch noch die beiden Seiten kenntlich macht. Ausser Modellen in möglichst genauer Nachbildung wurden immer auch noch solche in vereinfachter Form verfertigt.

Um die Art und Weise der Bewegung zu studiren, stellte ich grosse Reihen von Fallversuchen in der Weise an, dass ich die Organe oder die Modelle aus verschiedenen Fallhöhen auf einer hinreichend dicken, genau geebneten Schichte von trockenem, feinem Sand auffallen liess. Es wird dadurch zunächst das elastische in die Höhe springen vermieden und sie behalten den Ort, an welchem sie auffallen, nahezu bei. Wenn Letzteres nicht der Fall ist, wie bei drehenden Bewegungen, welche sich noch nach dem Auffallen fortsetzen, hinterlassen sie Spuren, welche bestimmte Anhaltspunkte für die Art und Weise des Auffallens sowohl, wie der zuletzt erfolgten Drehbewegung geben. Solche Fall-

versuche wurden aus geringen Höhen mit ganz kleinen Zwischenräumen von 1—3 cm angestellt.

In manchen Fällen wurden bei grösseren Modellen bestimmte Punkte der Kanten durch eingestochene feinste englische Nähnadeln, welche so dünn und leicht sind, dass sie die Funktion nicht merklich beeinträchtigen, bezeichnet. Damit erhält man dann sehr scharfe Spuren im Sande. Die Aufnahme solcher Spuren wurde, da sie sehr leicht verwischbar sind, in der Weise gemacht, dass dieselben (bei schiefer Beleuchtung) auf einer mit grösster Vorsicht darüber gelegten dünnen Glasplatte mit einem Pinsel und Tusche genau nachgezogen wurden. Vielfache Wiederholung gab Sicherheit in der Deutung jeder einzelnen Spur.

Ausserdem wurden höhere Fallräume zur Beobachtung der Gesammtbewegung sowie zur Messung der Fallzeiten angewendet. Das Zimmer, in welchem die bei weitem grösste Zahl der Fallversuche angestellt wurde, hatte wenig über 3 m Höhe und es wurden in Folge dessen namentlich Fallräume innerhalb dieser Grenze benützt. Ausserdem wurde schliesslich nach langem vergeblichen Suchen nach einem geeigneten höheren Räume in einem, öffentlichen Zwecken dienenden Saale Gelegenheit gefunden, eine grössere Reihe von Versuchen aus 6 m Fallhöhe anzustellen. Der Absicht, zwischen 3 und 6 m liegende, sowie noch höhere Fallräume zu benützen, traten aber so viele Hemmnisse in den Weg, dass sie schliesslich aufgegeben werden musste. Nur bei einigen Vorversuchen, namentlich ein paar Kontrolversuchen über die Fehlergrösse der Newton'schen Widerstandsgleichung und den Werth der Erfahrungskoeffizienten für die Gestalt der Widerstandsfläche, wurden mit grossen Schwierigkeiten ausnahmsweise 8 m Fallhöhe angewendet.

Was die Messung der Fallzeiten angeht, so wurde sie ausschliesslich in der Weise gemacht, dass ich die halben Tickschläge einer an's Ohr gehaltenen gut gehenden Ankeruhr laut mitzählte. Die Ankeruhren machen 150 Tickschläge in der Minute, von denen aber jeder ganz deutlich als Doppelschlag erscheint, so dass eigentlich 300 in der Minute = 5 in der Sekunde hörbar sind. Nach einiger Übung gelang es ganz leicht, indem ich immer nur bis 8 zählte und dann

wieder von vorn anfing, diese 5 Schläge pro Sekunde genau mitzuzählen. Mit dem ersten Schlag wurde der Körper fallen gelassen. Die Methode hiefür muss man für die einzelnen Formen immer erst ausprobiren, damit keine Verzögerung entsteht. Schon vor dem Fallenlassen wurde zu zählen angefangen und der Moment mit kräftigerer Stimme markirt, so dass eine zweite Person, welche dabei assistirte, der Kontrole halber mitzählen konnte. Letzteres ist namentlich bei höheren Fallräumen und kleinen Körpern ganz unerlässlich, wenn man sich nicht Fehlern aussetzen will. Nach einiger Übung kann man es zu einer wenigstens relativ hohen Genauigkeit bringen, welche eventuell sogar bis zu $^1/_{10}$ Sekunde steigen kann. Geringe, nicht mehr nachweisbare Luftströmungen sind dann die Ursache viel stärkerer Fehlerquellen als die angewendete Messungsmethode. Von der gefundenen Zahl wurde 1 abgezogen. Berührte das Organ z. B. auf den Schlag 5 den Boden, nachdem es mit 1 seine Bahn begonnen hatte, so betrug die Fallzeit $^4/_5$ also = 0,8 Sekunden.

Was die von der lothrechten abweichenden Bahnen angeht, so wurden dieselben durch auf der Unterlage angebrachte Marken festgestellt, sowie zum Theil auch durch ausgespannte Fäden, welche mit Skala versehen waren. Die während des Falles vorgenommenen Winkelmessungen wurden auf ähnliche Art gemacht und dann aus den Längen der Dreiecksseiten berechnet oder mittelst Vergleiches einer auf ein grosses Kartonblatt aufgetragenen Gradtheilung eines Halbkreises, sowie endlich durch Vergleich mit ausgeschnittenen Kartonstücken, welche dieselbe Winkelgrösse besassen.

Die zahlreichen Wägungen, welche behufs Berechnung der theoretischen Fallgeschwindigkeiten gemacht werden mussten, wurden mit einer ausgezeichnet funktionirenden chemischen Wage des pflanzenphysiologischen Institutes in München und zwar mit grosser Sorgfalt vorgenommen.

Die Flächeninhaltsmessungen geschahen bei den natürlichen Körpern für regelmässig oder nahezu regelmässig gestaltete Flächen durch Berechnung und Korrektur des Resultates durch Messung der Grösse der Abweichung. Im Allgemeinen wurde der Umriss mit einem sehr spitzen Blei-

stift möglichst genau nachgezogen und danach gemessen. Ganz unregelmässige Flächen wurden mittelst eines durchsichtigen Maassstabes von Pauspapier, welcher in Quadratmillimeter getheilt war, gemessen. Es lässt sich auf diesem Wege ein hoher Grad von Genauigkeit erreichen, wenn man die von der Umrisslinie durchschnittenen Quadratmillimeter mittelst einer mässig stark vergrössernden Loupe mit grossem Gesichtsfeld betrachtet und mit zuvor hergestellten, in verschiedener Richtung und Verhältniss getheilten grösseren Quadraten vergleicht. Etwaige kleine Fehler kompensiren sich, wenigstens bei etwas grösserer Fläche gegenseitig. Kleine Körper wurden unter dem Mikroskop mit der Kamera gezeichnet und bei entsprechenden Vergrösserungen mittelst eines vorher genau auf seine Zuverlässigkeit geprüften Zeiss'schen Okularmikrometers, sowie durch Benützung eines in $\frac{1}{20}$ mm getheilten Objektträgers, und zwar in jedem Fall auf beide Arten gemessen.

Versuche mit künstlich erzeugten Luftströmen, welche einer einigermassen genügenden Herstellung sehr grosse Schwierigkeiten bieten, wurden nur in sehr beschränkter Weise gemacht. Einmal um einige positive Anhaltspunkte für ihre Wirkungsweise auf schief gestellte Flächen zu erlangen, worüber sofort berichtet werden wird, und dann bei den Flugorganen des letzten Typus, worauf ich bei diesen kommen werde. Im Übrigen ersetzen, wie schon früher ausgeführt, einfache Fallversuche senkrecht aufsteigende, künstlich erzeugte Luftströme vollkommen. Künstlich erzeugte, horizontal oder schief gerichtete Luftströme wurden ebenfalls zu einigen Versuchen verwendet, ebenso wurden ein paar Versuche bei schwachem Winde im Freien gemacht, beide Arten von Versuchen jedoch in Folge der grossen Schwierigkeiten, welche sich der Ausführung entgegenstellten, nur in sehr untergeordneter Weise.

Ich habe hiermit nur die allgemeiner verwendeten Beobachtungsmittel aufgeführt. Über Benützung sonstiger speziellerer Methoden wird am geeigneten Orte berichtet werden.

Experimentelle Feststellung des Angriffspunktes des Luftwiderstandes an zu ihm schief gestellten Flächen.

Die Frage, wo greift der Luftwiderstand an einer gegebenen, beliebig gestalteten und beliebig gerichteten Fläche an, ist für den vorliegenden Gegenstand eine äusserst wichtige. Die Frage ist für unregelmässig gestaltete Flächen bisher überhaupt nicht, meines Wissens noch nicht einmal für regelmässig gestaltete Flächen in geneigter Lage gelöst worden. Der erste und einzige, welcher praktisch werthvolle Versuche darüber anstellte, scheint Magnus*) gewesen zu sein. Ausserdem sind mir keine weiteren Angaben bekannt geworden. Nachdem aber auch die Magnus'schen Versuche für uns so gut wie nicht anwendbar sind, da sie sich nicht auf dünne Platten übertragen lassen, mit welchen wir es bei den Flugapparaten der Fortpflanzungsorgane im Prinzip meist zu thun haben, so blieb mir nichts anderes übrig, als selbst einige betreffende Versuche anzustellen, um überhaupt eine bestimmte Vorstellung zu bekommen.

Die Versuche wurden so gemacht, dass ich rechtwinklich gestaltete dünne Karton- oder Papierblättchen von verschiedener Länge und Breite mit in der Richtung der Fläche verlaufenden materiellen Drehaxen versah. Diese Axen wurden parallel der Längs- oder Kurzkante in verschiedenen Entfernungen vom Schwerpunkte, welcher mit dem geometrischen Mittelpunkt zusammenfällt, angebracht, so dass sich die beiderseits der Axen befindlichen Flächen wie 1 : 15, 2 : 14, 3 : 13 u. s. f. bis 8 : 8 verhielten. Ich stellte nun die Axen in genau senkrechter Stellung frei beweglich, so dass das Blatt jede beliebige Stellung, welche man ihm gab, ohne weitere Drehung beibehielt, und liess horizontal gerichtete möglichst gleichförmige Luftströme von so grossem Querschnitt, dass das Blättchen in zu ihrer Richtung senkrechter Flächenstellung ganz von ihnen eingehüllt wurde, darauf einwirken. Je nach dem Grössenverhältniss der beiderseits der Axe gelegenen Flächen nimmt dann das Blättchen eine verschiedene Stellung zur Richtung des Luftstromes ein.

*) „Über die Abweichung der Geschosse" in Abh. d. Berl. Akad. 1852 p. 1.

Es oszillirt nämlich dabei um eine Gleichgewichtslage, welche erstens einem bestimmten Verhältniss der beiderseits der Axe gelegenen Flächen entspricht, zweitens von dem Verhältniss von Länge und Breite des Blättchens abhängig ist und drittens sich auch für verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten etwas verschieden gestaltet. Geht die Axe durch den Schwerpunkt, so dass die beiderseitigen Flächen gleich gross sind, so stellt sich das Blättchen in einen rechten Winkel zum Luftstrom. Gibt man ihm Anfangs die gleiche Richtung mit dem Strom, so lässt es sich in dieser Stellung nicht erhalten, sondern nimmt sofort wieder Querstellung an. Je weiter man nun die Axe von der Mitte des Blättchens gegen eine Kante rückt, um so spitzer wird der Winkel, welchen dasselbe mit der Stromrichtung einschliesst.

Man kann die Axe am besten mittelst eines ganz feinen aufgeklebten Papierstreifchens auf einer Seite des Blättchens befestigen, und lässt dann auf die andere ebene Seite den Luftstrom einwirken. Einfacher, wenn auch roher, ist es, wenn man die überhaupt zu diesem Versuch benützten feinsten englischen Nähnadeln durch die Papier- oder Kartonblättchen selbst sticht, was, wenn letztere dick genug sind, ohne Heraustreten der Nadel an die Oberfläche gelingt, und nun diese Axe in senkrechter Stellung in ein am besten verstellbares Axenlager bringt, welches man mittelst Holzstäbchen und Siegellack sich leicht herstellen kann.

Befestigt man das Gestell mit dieser Vorrichtung so auf eine Unterlage mit Gradtheilung, dass die verlängerte Axe gerade den Mittelpunkt des in Grade getheilten Kreises treffen würde, so kann man den Winkel, welchen das Blättchen mit der Stromrichtung macht, direkt ablesen.

Ich prüfte die Einstellung der Blättchen ausser bei ganz ebener Fläche auch noch, nachdem ich ihnen senkrecht zur Axenrichtung eine leichte Krümmung gegeben hatte, etwa in dem Grade, wie die Flügel wohl ausgebildeter Fichtensamen sie im senkrechten Längsdurchschnitte zeigen. Die gekrümmten Fähnchen stellen sich im letzteren Falle sofort mit der konvexen Seite gegen den Luftstrom und machen, wie auch theoretisch anzunehmen war, grössere Winkel mit der Stromrichtung.

Was nun das Resultat dieser Versuche angeht, so kann ich hier nur einige wenige sehr andeutungsweise Angaben darüber machen. Dieselben machen keinen Anspruch auf vollkommene Genauigkeit, sie sollen vielmehr nur das Verhalten schief gestellter Flächen im Prinzip zeigen und wie sich die Einzeldrücke des Luftwiderstandes auf die verschieden gelagerten Flächenelemente vertheilen. Eine Reihe weiter unternommener genauerer Versuche konnten für vorliegende Schrift, deren Herausgabe beschleunigt werden musste, leider nicht zu Ende geführt werden, was übrigens um so weniger den Gang unserer Betrachtung beeinträchtigt, als eine präcisere mathematische Behandlung der Bewegungen, welche ursprünglich geplant war, aus ähnlichen Gründen überhaupt vertagt werden musste.

Die Stromgeschwindigkeit, welche in Anwendung kam, betrug ungefähr 3—4 m pro Sekunde. Der Strom wurde mittelst eines grösseren Blasbalges hergestellt, dessen Ausflussrohr nach dem Muster des Magnus'schen Apparates mittelst eines Gummischlauches mit einem aus Weissblech gearbeiteten, rechtwinklich parallelepipedischen Kästchen verbunden war. Dasselbe hatte auf 6 cm Länge 2 cm Höhe und 4 cm Breite und von den beiden senkrechten Längswänden besass eine die Einströmungsöffnung mit angelöthetem kurzen Rohr und die andere gegenüberliegende war mit 147 runden Ausflussöffnungen von je 1,5 mm Durchmesser durchbohrt. Dieselben standen in 7 Reihen zu je 21 in gleichem Abstande von einander und hatten den Zweck, einen möglichst gleichförmigen, aus lauter gleichgerichteten und gleichstarken Strahlen bestehenden Luftstrom zu erzeugen. Die Mündung dieser Ausströmungsöffnungen befand sich in 4 cm Entfernung von dem Blättchen.

Blättchen von 15 mm Breite und 28 mm Länge, deren Axe in Querrichtung angebracht war, zeigten im horizontalen Strom folgenden Winkelausschlag zur Stromrichtung:

Flächenverhältniss:	Winkelgrösse:
$^3/_{13}$	5^0
$^4/_{12}$	12^0
$^5/_{11}$	29^0
$^6/_{10}$	53^0
$^7/_9$	71^0
$^8/_8$	90^0

Bei schwach gekrümmter Fläche, deren Krümmung derjenigen der stärker gekrümmten Fichtensamen entsprach, wie früher bemerkt wurde, war die Winkelamplitude eine viel grössere. Sie betrug im Durchschnitt etwa um 10^0 mehr als bei ebener Fläche.

Also stellt sich beispielsweise ein ebenes Blättchen von ähnlichen Dimensionsverhältnissen, dessen Drehaxe die ganze Fläche in dem Verhältniss von $^1/_{12}$ theilt, zu der Richtung des Luftstromes in einem Winkel von 12^0 in stabile Gleichgewichtslage ein, mit anderen Worten: Bei einer Neigung der Fläche von 12^0 hält der vom Luftstrom nächst getroffene Theil der Blattfläche, welcher nur den vierten Theil der Gesammtfläche beträgt, den entfernteren $^3/_4$ das Gleichgewicht. Die Resultante sämmtlicher auf die ganze Fläche ausgeübten Drücke geht somit durch die Drehaxe selbst. Die beiderseits so verschieden langen Hebelarme der statischen Momente halten sich die Wage, da die ihnen entsprechenden wirksamen Kräfte sich umgekehrt proportional verhalten.

Ganz ebenso muss ein derartiges Blatt, wenn sein Schwerpunkt nach einer Richtung verschoben ist, beim freien Fall sich verhalten. Auch hier muss es sich genau so mit der durch den Schwerpunkt gehenden Axe gegen den Luftstrom einzustellen suchen. Freilich kann es sich beim freien Fall nicht so leicht in dieser Lage erhalten.

Wie schon gesagt, wächst der Überdruck auf die vordersten getroffenen Flächentheile mit in der Richtung der Drehaxe steigender Breite der Blättchen. Wenn letztere in senkrechter Richtung zur Drehaxe gleich breit sind, in der Richtung der Drehaxe selbst aber verschiedene Dimensionen besitzen, so stellen sie sich somit bei gleicher Entfernung ihrer Drehaxe vom Mittelpunkt mit Zunahme der letztgenannten Dimension in einem immer grösseren Winkel zur Richtung des Luftstromes in Gleichgewichtslage ein. Es hängt dies an der, mit wachsender Verbreiterung zunehmenden Erschwerung des seitlichen Luftabflusses. Indess wage ich nicht, meine bezüglichen bisher gewonnenen Daten hier zu veröffentlichen, um nicht den Schein einer grösseren Genauig-

keit, als diese Versuche sie in Wirklichkeit beanspruchen können, zu erwecken.*)

*) Wie ich aus einer mir soeben erst im letzten Augenblicke vor der endgültigen Drucklegung zugänglich gewordenen Abhandlung von Kummer („Über die Wirkung des Luftwiderstandes auf Körper von verschiedener Gestalt, insbesondere auch auf die Geschosse") ersehe, hat dieser Autor die Frage nach der Lage des Angriffspunktes der Resultirenden des Luftwiderstandes ebenfalls bereits zum Gegenstande von Untersuchungen gemacht. Seine Versuche sind genau nach demselben Prinzip angestellt, wie die meinigen, aber mit ganz anderen Hülfsmitteln, als sie mir zu Gebote standen. Die Resultate entsprechen, abgesehen von grösserer Genauigkeit, den meinigen aus den oben mitgetheilten vorläufigen Versuchen. Meine eigenen Resultate genügen hier übrigens um so mehr, als es sich in vorliegender Arbeit im wesentlichen nicht um quantitative sondern um qualitative Analyse der Bewegungen handelt.

III Abschnitt.

Spezielle Betrachtung.

A.

Eintheilung der pflanzlichen Flugorgane.

Überaus mannigfaltig sind nun im Einzelnen die Mittel, welche, wenn man sich so ausdrücken darf, behufs Oberflächenvergrösserung zur Verwendung kommen, und die Morphologie der betreffenden Einrichtungen, wie sie Hildebrand in seinem vortrefflichen Buche „über die Verbreitungsmittel der Pflanzen" in übersichtlichen Zügen vorgeführt hat, ist biologisch in hohem Grade lehrreich. Es kann selbstverständlich nicht in meiner Absicht liegen, auf diese Dinge hier nochmals einzugehen und ich verweise die Leser hiermit ausdrücklich auf jene reiche Quelle von einschlägigen Thatsachen. Nur einiges wenige, soweit es für das Verständnis des hier vorgetragenen unumgänglich nothwendig erscheint, muss davon berührt werden.

Wie schon früher ausgeführt, ist neben der äusseren Gestalt die Massenvertheilung für die frei fallenden Körper von allergrösster Wichtigkeit und um zu allgemeinen Gesichtspunkten zu gelangen, müssen wir, ganz abgesehen von der morphologischen Bedeutung der einzelnen Theile, welche beim Zustandekommen der Flugorgane mitwirken, nur an diese beiden Verhältnisse uns halten.

Die ungeheure Menge der Einzelformen lässt sich ohne irgendwie bedeutenden Zwang nach solchen Eintheilungsprinzipien gruppiren, wobei selbstverständlich Mittelformen nicht ausgeschlossen sind, wie ja überhaupt die Schablone in die Natur erst hineingetragen werden muss, will man sie darin finden.

Wenn also beispielsweise bei einem Körper die Oberfläche auf die Art vergrössert ist, dass seine Massentheilchen nicht kompakt zusammen und dicht nebeneinander geordnet sind, sondern dass sie gewissermassen ein schwammiges Gewebe bilden, welches grosse luftgefüllte Hohlräume zwischen sich lässt, so ist es für die Funktion des betreffenden Körpers, dessen spezifisches Gewicht dadurch im Ganzen verändert wird, ziemlich gleichgültig, wie dies erreicht ist, vorausgesetzt, dass seine äussere Gestalt dadurch nicht geändert wird. Ob die Vergrösserung des Umfanges durch schwammig werden des eigentlichen Körpers selbst oder Ausrüstung mit besonderen blasig aufgetriebenen oder schwammigen Hüllen, beispielsweise durch aufgetriebene Fruchtkelche, durch allseitige dichte Haar- oder Wollbekleidung, oder endlich durch schwammige oder blasige, dicht anliegende sonstige Anhängsel geschieht, ist für die Funktion einerlei, wenn die so verschieden ausgerüsteten Körper bei ähnlichem Umriss ähnliches spezifisches Gewicht und ähnliche Schwerpunktslage besitzen.

Bei der Ausbildung von flügel- oder fallschirmartigen Anhängseln ist es für die Funktion im Wesentlichen gleichgültig, ob diese Flügel oder Fallschirme häutig sind, oder ob sie aus einfachen oder gefiederten, eine Art Gitter darstellenden Haarreihen oder Haarkronen gebildet werden. Der Effekt ist derselbe, nur wird auf dem letzteren Wege durch die ganz ausserordentliche Leichtigkeit des Apparates ein noch höheres Maass der Leistungsfähigkeit bei geringstem Materialverbrauche erzielt. Für rascher rotirende Organe ist die Flächenvergrösserung der peripherischen Theile durch Haare meines Wissens ausgeschlossen. Die Flügel sind in solchem Falle nie durch Haarschichten oder Haargitterwerk gebildet. Wenn auch die Biegungsfestigkeit der Haare gegenüber dem mit dem Quadrat der Bewegungsgeschwindigkeit steigenden Luftwiderstande ausreichen würde, so wäre doch der Reibungskoeffizient einer solchen Fläche ein viel zu hoher.

Die Massenvertheilung, respektive die Lage des Schwerpunktes, hängt bei den mit Anhangsgebilden ausgerüsteten Flugorganen wesentlich von der Lage ihres Hauptkörpers,

nämlich der Nuss ab. „Nuss“ nenne ich denselben der Kürze halber, ganz abgesehen von der morphologischen Bedeutung dieses Wortes, und zwar sowohl bei Früchten wie bei Samen. In selteneren Fällen ist der Hauptkörper selbst, ohne besondere Anhangsgebilde, zum geflügelten Organe umgestaltet. Auch hier nenne ich den relativ am meisten Masse enthaltenden und daher schwersten Theil des Gesammtorganes „Nuss“. Der Ausdruck „Last“, welcher mechanisch richtiger wäre und vollkommen die hier dem Worte Nuss untergelegte Bedeutung besitzt, wurde nur desshalb nicht angewendet, weil in gewissen Fällen zweierlei Belastung vorkommt. Ausser der durch die Nuss dargestellten und durch Luftströme zu befördernden eigentlichen Last ist in Folge einseitiger Verdickung des Flügels hier noch eine Nebenbelastung, welche mechanischen Zwecken dient, vorhanden.

Von dem spezifischen Gesammtgewichte, der Grösse, der äusseren Gestalt und der Lage des Schwerpunktes hängt nun im Allgemeinen das Verhalten der Flugorgane ab, und davon ausgehend, lässt sich eine Anzahl einfacher Haupttypen oder wenn man will Hauptgruppen von pflanzlichen Flugorganen aufstellen. An sie reiht sich eine Unsumme von Zwischentypen, die nicht scharf ausgesprochen zu einem bestimmten Haupttypus gehören.

Solche Zwischentypen können wiederum entweder in der Mitte zwischen zwei nahe verwandten Haupttypen stehen, so dass sie nicht ausgesprochen einem oder dem andern angehören, sie können aber auch gleichzeitig mehrere, ganz verschiedenartigen Typen zukommende Flugeinrichtungen besitzen. Die letzteren wären gegenüber den ersteren, welche einfache Zwischentypen darstellen, als zusammengesetzte Zwischentypen zu bezeichnen.

Vorliegende Blätter beschäftigen sich nur mit den Haupttypen der Flugorgane.

Es scheint mir der Natur entsprechend und gleichzeitig zweckmässig, folgende 12 Haupttypen zu unterscheiden (vgl. hierzu Taf. I., Fig. I—XII sowie die Abbildungen einiger natürlicher Organe auf Taf. II und III):

I. Staubförmige,

II. Körnchenförmige,
III. Blasig aufgetriebene,
IV. Haarförmige,
V. Flach scheibenförmige,
VI. Convex scheibenförmige,
VII. Fallschirmförmige,
VIII. Flügelwalzenförmige,
IX. Länglich plattenförmige,
X. Länglich plattenförmige mit einer belasteten Längskante,
XI. Länglich plattenförmige mit einer belasteten Kurzkante,
XII. Länglich plattenförmige mit einer schwach belasteten Längskante und einer stark belasteten Kurzkante.

Eine Eintheilung, welche sich ganz ausschliesslich an die Gesammtfunktion anschlösse, ohne Berücksichtigung der hier verwertheten Momente, oder wenigstens gewisser Unterschiede in den mechanischen Einzelvorgängen, würde sich enge an die gegebene anlehnen, nur würde sich die Zahl der Typen vermindern und eine etwas andere Gruppirung eintreten. Die Typen I – IV, VI und VII könnte man von solchem Gesichtspunkte aus in einen einzigen Typus zusammenfassen, da der sichtbare Vorgang beim Fall in ruhiger Luft in geradliniger lothrechter Abwärtsbewegung ohne Drehung besteht.

Der X. Typus verbindet fortschreitende Horizontalbewegung mit der Vertikalbewegung, und zwar typisch ebenfalls ohne beschleunigtere Drehung. Die übrigen 5 Typen dagegen machen mehr oder minder beschleunigte Drehbewegungen. Sie drehen dabei entweder vertikal, wobei die Bahn ihres Schwerpunktes stark von der lothrechten abweicht (hiezu gehören der V., VIII. und IX. Typus, welche man, da das Prinzip der Bewegung das gleiche ist, ebenfalls in eine einzige grössere Gruppe vereinigen könnte), oder sie drehen horizontal bei lothrechter Schwerpunktsbahn (XII. Typus), oder endlich sie drehen gleichzeitig horizontal und mehr oder weniger vertikal, wobei sie ebenfalls eine lothrechte Bahn ihres Schwerpunktes erzeugen (XI. Typus).

Wir erhalten bei solcher Gruppirung demnach nur

5 Typen, von welchen sich der erste und der dritte wieder in Untertypen spalten. Wir werden uns indessen bei der Aufzählung der Formen an unsere erste Eintheilung halten und bei der Zusammenfassung der Gesammtresultate auf die letztere nochmals zurückkommen.

Unsere Eintheilung trennt, wie ich ausdrücklich betonen will, die verschiedenen Funktionsarten bei den natürlichen Organen nicht alle prinzipiell. Bei gewissen Gruppen können die Organe durchgehends zwei verschiedene Bewegungsarten besitzen. Die zufällig zuerst eingeleitete Bewegungsform erhält sich dann meist dauernd. Es ist dies speziell bei den Organen des IX. Typus der Fall, wo nicht selten in Folge schwach konvexer Krümmung des Flügels, sei es dass derselbe ursprünglich diese Form besitzt, oder dass erst der Luftwiderstand sie erzeugt, aus dem gleichen Grunde wie bei den Organen des VI. Typus, senkrecht geradlinige Bewegung neben der typischen vorkommt. Letztere stellt eine, unter beschleunigter Rotation um die Längsaxe (welche eine stabile Hauptträgheitsaxe ist) vor sich gehende, schiefwinklich zur Erde gerichtete Kurvenbewegung dar. Ganz flache und nicht allzu biegsame Organe des Typus müssten sie ausschliesslich besitzen, doch ist mir keine Form bekannt, bei welcher nicht auch Individuen von der anderen Funktionsart vorkämen. Ebenso können flachere Formen des VI. Typus sich auch analog denjenigen des V. verhalten. Derartige Organe stellen eben nichts anderes, als Beispiele der erwähnten sogenannten „einfachen Zwischentypen" vor. Wenn der Haupttypus mit einer einzigen charakteristischen Bewegungsform nur ausnahmsweise auftritt, muss sich natürlich Studium und Charakteristik der Bewegung mehr an typisch funktionirende Modelle anschliessen.

Indem ich nun auf die Besprechung der mechanischen Funktion der einzelnen Flugkörper übergehe, will ich zunächst bemerken, dass natürlich nur solche Fortpflanzungsorgane als „fliegend" anzusehen sind, deren Ausrüstung zweifellos und ausschliesslich — oder wenigstens hauptsächlich — zur Benützung des Luftwiderstandes dient. Solche dagegen, welche mit Wanderorganen anderer Art versehen sind und welche nur zufällig einmal vom Winde trans-

portirt werden, wie z. B. die mit Hakenborsten ausgerüsteten Früchte von Agrimonia oder andere beliebige Formen, kommen nicht in Betracht.

Ich werde die Haupttypen nun immer zuerst kurz charakterisieren, und einige Beispiele anführen. Daran reihen sich einige allgemeine Erörterungen, namentlich über die Axenverhältnisse der Körper, soweit sie in Betracht kommen. Es folgen sodann Beobachtungsresultate an einer oder auch mehreren Formen natürlicher Flugorgane und ein Vergleich derselben mit den theoretischen Fallgeschwindigkeiten, um Anhaltspunkte für die Leistungsgrösse eines jeden Typus zu gewinnen. Zum Schlusse wird jedesmal die Mechanik der Vorgänge einer qualitativen Prüfung unterzogen, sowie über Versuche mit Modellen berichtet.

Dem Leser wird eine nicht unbedeutende Ungleichheit in der Behandlung der einzelnen Typen nicht entgehen. Dieselbe war aber aus verschiedenen schon erwähnten Gründen nicht zu vermeiden. Ausserdem beanspruchen gewisse Bewegungsformen ein sehr viel höheres Interesse als andere einfachere. Namentlich ist dies der Fall bei den Organen des XII. Typus. Hier habe ich, was im Übrigen nicht geschah, in der Aufzählung der zugehörigen Formen wenigstens eine g e w i s s e Vollständigkeit angestrebt.

B.

Charakteristik der Haupttypen. Versuchsergebnisse. Mechanische Erklärung der Bewegungen.

I. Haupttypus.

Die Staubförmigen Flugorgane.

(Taf. I, Fig. I., 1.—3. vgl. hiezu Fig.-Erkl.)

Kleinste Körper von verschiedenem Umriss, bald ganz isodiametrisch, kugelig, bald kurz zylindrisch bis länglich zylindrisch oder auch mehr oder weniger unregelmässig gestaltet. Dieselben sind so klein, dass die an ihrer Oberfläche verdichtete Lufthülle ohne wesentliche Gewichtserhöhung den in Bezug auf den Luftwiderstand wirksamen Querschnitt sehr bedeutend vergrössert. Das spezifische Gewicht der Körper sammt Lufthülle ist gegenüber demjenigen der Körper allein sehr erheblich vermindert. Die ganz typisch gestalteten (isodiametrischen) Formen drehen nicht und besitzen mehr oder weniger indifferente Gleichgewichtslage. Auch wo Drehungen vorkommen, haben dieselben übrigens keinen Einfluss auf die Fallgeschwindigkeit. Die Bewegung des Schwerpunktes ist in ruhiger Luft eine mehr oder weniger geradlinige senkrechte. Die Fallverzögerung ist höchst bedeutend, ist die grösste bekannte und würde bei gleichbleibendem mittlerem Vertikaldurchmesser der Körper in einem umgekehrten Verhältniss zu der Grösse ihrer horizontalen Projektionsfläche stehen.

Es gehören hierher die kleinsten bekannten lebenden Gebilde, die Spaltpilze, sodann Sporen von Pilzen, Algen, Moosen, Gefässkryptogamen und der Windpollen der Blüthenpflanzen. Die ersteren sind für das unbewaffnete Auge überhaupt unsichtbar, die grösseren der letzteren erscheinen als gerade noch sichtbare kleine Pünktchen.

Wie Nägeli in seiner Abhandlung „Über die Bewegung kleinster Körperchen“ *) gezeigt hat, wächst mit der zunehmenden Kleinheit fester Körper die relative Grösse der an ihrer Oberfläche verdichteten Lufthülle immer mehr. Letztere mag noch so dünn sein, von einer gewissen Grösse des Körpers an muss sie, indem sie den wirksamen Querschnitt ohne Gewichtsvermehrung vergrössert, in der Luft fallverzögernd wirken. Die verursachte Fallverzögerung ist nach vorläufigen Versuchen Nägelis so bedeutend, dass bei grösseren Weizenstärkekörnern beispielsweise die gleichförmige Fallgeschwindigkeit nur den fünften Theil der berechneten beträgt. Unter Vernachlässigung aller unberechenbaren Faktoren, wie der Grösse der seitlichen Reibung, berechnete Nägeli die Dicke des, ein solches Stärkekorn einhüllenden Luftmantels auf 0,04 mm Dicke, indem er die ganze beobachtete Grösse des Luftwiderstandes in dem wirksamen Querschnitt ausdrückte.

Micrococcus.

Über die Fallgeschwindigkeit der allerkleinsten bekannten pflanzlichen Flugorgane, der Spaltpilze, hatte Nägeli keine Versuche angestellt und auch keine zahlenmässige Berechnung der theoretischen Fallgeschwindigkeit gemacht.

Nachdem auch ich bis jetzt nicht in der Lage war, solche Versuche anstellen zu können, so ist es wenigstens von Interesse, zum Vergleich mit anderen Formen, für welche Beobachtungen vorliegen, die theoretische Fallgeschwindigkeit für einen positiven Fall zu berechnen.

Am bequemsten eignen sich hiefür, abgesehen von der höchsten Stufe der Kleinheit, welche diese Organismen erreichen, wegen ihrer regelmässig kugeligen Gestalt, die Micrococcus-Formen. Wenn wir, unter Vernachlässigung der verdichteten Lufthülle, den Durchmesser einer lufttrocknen Micrococcuszelle der Wirklichkeit entsprechend zu 0,00025 mm annehmen, und ihr spezifisches Gewicht gleich 1,4 setzen, so berechnen sich daraus die Projektionsfläche (gleich dem grössten Kugelkreise $= r^2\pi$) zu 0,000000049 qmm, das

*) Sitz.-Bericht der Münchener Akademie v. 7. Juni 1879.

Volumen ($= {}^4/_3\ v^3\ \pi$) zu 0,000000000081804 cmm und das Gewicht (= Volumen mal spezifisches Gewicht) zu 0,000000000114 mgm. Stellen wir die früher (pag. 22) entwickelte Gleichung für den Luftwiderstand in der Weise um, dass wir anstatt des bekannten w (Gewicht) v (die Fallgeschwindigkeit) suchen, so bekommen wir

$$v = \sqrt{\frac{2\,g \cdot w}{\gamma\, f\, 3}}$$

In diese Gleichung setzen wir die gefundenen Grössen für Gewicht (w) und Projektionsfläche (f), den Widerstandskoeffizienten für die Kugelfläche (3 = 0,5) und die Grössen für g und γ in Millimetern und Milligrammen ($2 \cdot g = 2 \cdot 9{,}81$ m = 19620 mm; γ ist das Gewicht eines cmm Luft von 0^0 = 0,001293 mgm). Wir haben dann

$$v = \sqrt{\frac{19620 \cdot 0{,}000000000114}{0{,}001293 \cdot 0{,}000000049 \cdot 0{,}5}}$$

$$v = 84 \text{ mm}$$

d. h. eine kugelige Micrococcuszelle von den angegebenen Verhältnissen würde, wenn sie sich im übrigen ähnlich verhielte, wie ein grösserer kugeliger Körper ohne zu berücksichtigende Lufthülle, in der Sekunde 84 mm durchfallen.

In Wirklichkeit wird sie jedoch sehr viel langsamer fallen. Es lässt sich zwar einstweilen durchaus kein sicherer Anhaltspunkt für die Grösse der verdichteten Lufthülle, welche der Oberfläche einer Micrococcuskugel anhaftet, gewinnen, aber nach Analogie der Beobachtungen Nägelis, sowie der Resultate meiner Fallversuche an Lycoperdonsporen muss dieselbe einen sehr bedeutenden Einfluss ausüben.

Höchst wahrscheinlich beträgt die thatsächliche Fallgeschwindigkeit pro Sekunde keinen Millimeter. Stünde dieselbe im nämlichen Verhältnisse zur berechneten Geschwindigkeit wie bei den Lycoperdonsporen, so würde sie etwa den siebenzigsten Theil, genau 1,16 mm betragen. Nachdem jedoch eine Micrococcuszelle von angegebener Grösse einen Durchmesser von nur $\frac{1}{15}$ einer Lycoperdonspore besitzt, was $\frac{1}{3256}$ der Masse der letzteren entspricht, wogegen ihre Pro-

jektionsfläche $\frac{1}{219}$ beträgt, so muss der durch die verdichtete Lufthülle erzeugte Querschnitt im Verhältniss sehr gross werden, obschon die Lufthülle auf der stärker gekrümmten Oberfläche der 15mal dünneren Kugel absolut dünner werden muss (am dicksten muss sie auf konkaven Flächen werden.) Ich will keine, nach Lage der Dinge doch höchst hypothetische Berechnung dieser Hülle, sowie der wahrscheinlichen Fallgeschwindigkeit versuchen, indessen kann die letztere sicherlich nur Bruchtheile eines Millimeters pro Sekunde betragen.

Sporen von Lycoperdon caelatum.

Die olivenbraunen Sporen wurden reifen bereits geplatzten $1-1^1/_2$ Faust grossen Fruchtkörpern des Pilzes entnommen. Sie bilden ein trockenes, ausserordentlich feines, locker in der Höhlung liegendes Pulver.

Die einzelnen lufttrockenen Sporen stellen fast vollkommen kugelige Körper dar*) mit grossem stark lichtbrechendem Zellkern, welcher einen grossen Theil der Höhlung ausfüllt. Ansehnlichere Schwankungen in der Grösse der Sporen kommen zwar vor, sind aber überaus selten. Die ungeheure Mehrzahl zeigt vielmehr vollkommen übereinstimmende Dimensionen. Der Durchmesser einer Spore beträgt nach sehr genauer Messung 0,0037 mm, der Radius somit 0,00185 mm. Die Projektionsfläche ($r^2 \pi$) beträgt 0,00001075 qmm. Das Volumen ($^4/_3 r^3 \pi$) 0,00000002652 cmm. Nehmen wir das spezifische Gewicht analog demjenigen lufttrockner Bakterienzellen zu 1,4 an, so beträgt das Gewicht somit 0,000000037128 mgm.

Nachdem die Sporen in freier Luft von ganz unmerklichen Luftströmen, z. B. in scheinbar ruhiger Zimmerluft, in die Höhe getragen werden, so wurden die Fallversuche in folgender Weise angestellt: Über einer, in genau vertikaler Stellung befestigten Glasröhre von nicht ganz 5 cm lichtem Durchmesser und 55 cm Höhe wurde mittelst sehr fest anliegender Gummikappe ein rundes, die Röhre gerade

*) Ganz genau genommen sind sie etwas birnförmig, mit äusserst dünnem, kurzem Stielansatz. Das Volumen ist dadurch nicht verringert.

abschliessendes Kartonblatt befestigt, dessen untere Fläche mit einer dünnen Schichte der Sporen bedeckt war. Diese Schichte wurde dadurch erzeugt, dass Sporenpulver darüber gestreut und dann durch Blasen grösstentheils wieder entfernt wurde. Bei schwacher Erschütterung, durch einen leichten Schlag mit einem Stäbchen gegen die obere Partie der Röhre, wurden nun eine Anzahl der weniger fest haftenden Sporen abgelöst und fielen bei absolut ruhiger Luft innerhalb der Röhre vertikal abwärts. Dieselben wurden am untern Ende aufgefangen mittelst 45 cm langer, 2 cm breiter Glasplatten, welche mit einer dünnen Lage Glyceringelatine überzogen waren und welche langsam unter der Mündung des Rohres entlanggezogen wurden. Längs ihres Randes war ein schmales Papierstreifchen aufgeklebt, welches durch $\frac{1}{2}$ cm von einander entfernte Querstriche in fortlaufend nummerirte Felder getheilt war. Sie wurden dabei so langsam verschoben, dass während eines Fallversuches auf je 8 halbe Tickschläge der Uhr *) ein neues Feld in die Mitte der Rohröffnung rückte, und die Ankunftszeit der auf sie fallenden Sporen so festgestellt werden konnte. An dem unteren Ende der Glasröhre war ein ringsum dicht schliessendes Diaphragma aus Karton angesetzt, welches in seiner Mitte eine 1,5 cm lange, $\frac{1}{2}$ cm breite Öffnung besass. Ausserdem war dieses Rohrende noch durch einen $1\frac{1}{2}$ cm breiten Kartonansatz verlängert, welcher zum Durchlass der Glasplatten beiderseits mit einer entsprechenden Öffnung versehen und auf einer Unterlage ringsum dicht befestigt war. Die Öffnung im Diaphragma war quer zur Bewegungsrichtung der Glasplatten angebracht. So konnten nur die längs der Mitte des Rohres sich abwärts bewegenden Sporen auf die Unterlage gelangen und die Ruhe der Luft im Rohre war, da letzteres, wie wir sahen, oben fest abgesperrt war, vollkommen gesichert.

Nach einigen missglückten, zum mindesten Zweifel

*) vgl. „Methoden der Untersuchung".

lassenden Versuchen wurden folgende weiteren Vorsichtsmassregeln beobachtet. Zunächst wurden die Versuche nur an ganz oder fast ganz windstillen Tagen und zwar in einem Raume gemacht, in welchem mit den Sporen vorher nicht manipulirt worden war. Ausserdem wurde vor der Präparation der Platten und Anstellung der Versuche sorgfältigstes Abwaschen der Hände sowie Wechsel der Kleidung vorgenommen.

Der untere Theil der Röhre wurde mit einem viereckigen, hölzernen Kasten umgeben, dessen beide Seitenwände dicht am Boden Öffnungen besassen, durch welche die Glasplatten durchgeschoben werden konnten. (Figur 2 Taf. IV gibt ein verkleinertes Bild des medianen Längsdurchschnittes des fertigen Apparates.) Das ganze Innere des Kastens, der Glasröhre, des Kartonansatzes, sowie das Diaphragma beiderseits und die Ränder seiner Öffnung, wurden mit stark glycerinhaltiger Gelatine überzogen, damit anhängende Sporen dauernd festgehalten wurden und nicht in Folge irgend welcher zufälligen Erschütterung sich ablösen und das Resultat trüben konnten, wie bei den ersten Versuchen mehrfach geschah. Auch die gefelderten Papierstreifen auf den Platten wurden so behandelt. Es wurden überhaupt alle möglichen Vorsichtsmassregeln, welche ich nicht sämmtlich einzeln aufzählen will, angewendet, vor allem auch jede Erschütterung des Apparates auf das sorgfältigste vermieden.

Nach den Versuchen wurden die Glasplatten mittelst des Mikroskopes wiederum in einem besonderen Raum untersucht. Die systematische Untersuchung einer solchen Platte erforderte bei hinreichender Sorgfalt nicht unter 5—6 Stunden Zeit.

Es wurden im ganzen 11 Versuche gemacht, von denen nur die 3 letzten brauchbare Resultate lieferten und keinen Zweifel mehr über die Richtigkeit des Resultats aufkommen liessen. Die ersten 8 Versuche dagegen blieben unsicher in Folge ungenügender Vorsichtsmassregeln.

Der 9. Versuch, welcher der gelungenste war und welcher durch den 10. und 11. bestätigt wurde, lieferte folgendes Ergebniss: Bis zum 29. Feld war die Platte frei von Sporen. Von hier an bis zum 54. Feld fanden sich zer-

streut kleinere und grössere, mehr oder weniger dicht zusammenhängende Sporenhaufen, meist mit kleinen Capillitiumstückchen verbunden, und zwar wurden diese Haufen vom 29. bis zum 54. Feld immer kleiner. Auf dem 29. Feld lag ein grosser Haufe von mehreren hundert Sporen mit einem langen und dicken Capillitiumzweig, auf dem 54. Feld lag ein kleines lockeres Häufchen von 12 Sporen ohne Capillitiumreste. Im ganzen zählte ich 15 solcher Sporenhaufen.

Auf das 54. bis zum 77. Feld war nichts niedergefallen, dagegen vom 75. bis zum 84. Feld eine Anzahl einzelner Sporen und zwar 10 an der Zahl, von denen nicht weniger als 5 auf dem 79. Feld selbst und zwar zerstreut herumlagen.

Nachdem zwischen jeder Verschiebung um ein Feld 8 halbe Tickschläge der Uhr stattgefunden hatten, so entsprachen die betreffenden Felder folgenden Fallzeiten:

Das 29. Feld entsprach $\frac{29 \cdot 8}{5} = 46$ Sek., das 54. Feld $= \frac{54 \cdot 8}{5} = 86$ Sek., das 75. Feld $\frac{75 \cdot 8}{5} = 120$ Sek., das 79. Feld $\frac{79 \cdot 8}{5} = 126$ Sek. und das 84. Feld $\frac{84 \cdot 8}{5} = 132$ Sek. Fallzeit. Somit fallen, wie auch von vornherein selbstverständlich, die grösseren Sporenhaufen am raschesten, die kleineren langsamer und die einzelnen Sporen am langsamsten. Der wirkliche Fallraum betrug 561 mm und somit legten die 5 einzelnen Sporen, welche auf das 79. Feld gefallen waren, in der Sekunde einen Weg von $\frac{561}{126} = 4{,}45$ mm, d. h. noch nicht einmal einen halben Centimeter zurück. Die etwas früher oder später aufgefallenen kommen dieser Geschwindigkeit sehr nahe und es schwankt die Fallgeschwindigkeit danach überhaupt zwischen 4,25 und 4,67 mm in der Sekunde. Die Geschwindigkeit von 4,45 mm stellt, auch nach den beiden anderen Versuchen, eine mittlere Geschwindigkeit dar. Dabei ist die anfängliche Fallbeschleunigung freilich nicht berücksichtigt. Indess würde sie bei der langen Fallzeit von 126 Sekunden das Resultat nur sehr wenig än-

dern, indem die Differenz sich auf noch nicht 0,01 mm pro Sekunde belaufen könnte.

Beim 10. Versuch waren nur 2 kleinere Sporenhaufen ausser einzelnen Sporen auf die Platte gelangt und beim 11. nur mehr einzelne Sporen. Es war dies die Folge, dass für die letzten Versuche der nämliche sporenüberzogene Karton beibehalten wurde, von welchem sich anfänglich namentlich die schwereren Sporenhaufen ablösten. Die Übereinstimmung in der Fallgeschwindigkeit der Sporenhaufen war vollkommen und geradezu überraschend diejenige der Einzelsporen.

Führen wir die beobachtete Fallgeschwindigkeit von 4,45 mm pro Sekunde in unsere Widerstandsgleichung ein, indem wir gleichzeitig die anfangs berechnete Grösse für die Projektionsfläche (f = 0,00001075) sowie diejenige für den Koeffizienten 3 (= 0,5) einsetzen, so bekommen wir

$$w = 0{,}5 \cdot 0{,}001293 \cdot 0{,}00001075 \cdot \frac{4{,}45^2}{19620}$$

$$w = 0{,}000000000070145 \text{ mgm.}$$

Danach beträgt also der Widerstand, welchen die Luft den mit der Geschwindigkeit von 4,45 mm fallenden Sporen zu leisten hat, nur $\frac{1}{5293}$ des wirklichen Gewichtes. Berechnen wir die Projektionsfläche, welche der beobachteten Fallgeschwindigkeit entspricht, so können wir dieselbe ebenfalls aus der Gleichung erhalten, oder noch einfacher, wenn wir die aus dem Sporendurchmesser berechnete Querschnittsfläche mit 5293 multipliziren, da Querschnitt und Gewicht in umgekehrtem Verhältniss zu einander stehen. Dieselbe würde danach 0,0569 betragen.

Gegenüber der beobachteten Fallgeschwindigkeit der Lycoperdonsporen ergibt die Berechnung derselben aus den anfangs gegebenen Grössen

$$v = \sqrt{\frac{19620 \cdot 0{,}000000037128}{0{,}001293 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}00001075}}$$

$$v = 323 \text{ mm}$$

also eine Geschwindigkeit, welche um nicht weniger als das 72fache die beobachtete übertrifft.

Diese höchst bedeutenden Unterschiede zwischen den gemessenen und berechneten Grössen lassen sich, nachdem die Widerstandsformel für grössere Körper, wenn auch nicht ganz genau, doch erfahrungsgemäss annähernd richtig ist, nur durch die Annahme einer sehr bedeutenden Lufthülle erklären, welche der Oberfläche der Sporen mehr oder minder fest anhaftet und die beim Fall der Luft Widerstand leistende Fläche vergrössert. Ausserdem muss die Reibung, welche zwischen den Lufttheilchen der Hülle und denjenigen der ruhenden umgebenden Luft stattfindet, indem Theilchen der Hülle losgerissen und aneinander verschoben werden, eine nicht ausser Acht zu lassende Rolle spielen. Die Grösse der letzteren für sich allein ist unberechenbar, und lässt sich zunächst nur durch den grösseren Widerstand überhaupt ausdrücken, welchen eine entsprechend grössere Fläche der Luft leistet.

Wie wir gesehen haben, entspricht der beobachteten Fallgeschwindigkeit von 4,45 mm bei dem angegebenen Gewicht eine Kugelfläche von der Projektionsgrösse 0,0569 qmm. Nachdem die Projektionsfläche dem grössten Kugelkreis $r^2 \pi$ entspricht, so wäre nach der Formel $r = \sqrt{\frac{f}{\pi}}$ der Radius der luftumhüllten Spore

$$r_1 = \sqrt{\frac{0{,}0569}{3{,}1415}}$$

$$r_1 = 0{,}1345;$$

der gemessene Radius der Spore r beträgt aber nur 0,00185 mm, somit gäbe $r_1 - r = 0{,}13265$ mm die Dicke der die Spore umgebenden mehr oder weniger verdichteten Lufthülle an. Dieselbe würde danach also über $\frac{13}{100}$ mm betragen.

Wenn wir den Koeffizienten $3 = 1$ setzen, so erhalten wir als Resultat der Berechnung für v immer noch 228 mm Fallgeschwindigkeit, welche die beobachtete um das 51fache übertrifft. w ist dann 0,000000000014029 mgm und $f = 0{,}02845$ qmm, also beide Grössen das 2646fache der berechneten und die Dicke einer, diesen Widerstand erzeugenden unbeweglichen kugeligen Lufthülle um die Spore würde,

da r_1 in diesem Falle 0,09478 mm beträgt, aus $r_1 - r$ sich zu 0,09293 mm berechnen.

Eine solche fast unglaublich erscheinende Dicke der unbeweglichen Lufthülle, welche kugelförmige Gestalt besässe, würde dem angenommenen spezifischen Gewicht der Sporen von 1,4 entsprechen. Sollte letzteres auch etwas zu hoch angenommen sein, so würde die mögliche geringe Reduktion keinen wesentlichen Einfluss auf das Resultat obiger Berechnung gewinnen.

Eine direkte Gewichtsbestimmung der Sporen ist nicht auszuführen, indem dieselben sich in Folge überaus leichter Adhäsion aneinander in lockere traubige Massen zusammenballen, welche bedeutende Luftquantitäten zwischen sich lassen. Man kann diese Luft auch bei sehr ansehnlichem Druck nicht ganz entfernen. Eine chemische Analyse oder andere Methoden, welche genaueren Aufschluss hätten geben können, waren wegen unzureichenden Materials vorerst nicht möglich.

Das Resultat dieser Berechnung ist aber abgesehen hiervon nicht genau, weil die Genauigkeit des quadratischen Widerstandsgesetzes für sehr kleine Geschwindigkeiten steigend abnimmt. Nachdem indessen zwischen den Grössen w, v und f die in der Widerstandsgleichung ausgedrückte Beziehung besteht, so geht daraus hervor, dass bei einem Widerstand, welcher in stärkerem Verhältniss, als dem des Quadrates der Geschwindigkeit abnimmt, bei gleichbleibendem w (Gewicht) die Grösse f wachsen muss. Somit geben obige Berechnungen in Wirklichkeit einen zu geringen Betrag für die Projektionsfläche einer unbeweglichen kugeligen Lufthülle.

Im übrigen gibt die Berechnung keine wirklich richtige Vorstellung der wahren Lufthülle, denn diese kann nicht unbeweglich sein, sondern ihre Dichtigkeit muss nach aussen steigend abnehmen, so dass der grösste Theil derselben nur äusserst locker anhängt und bei der Fallbewegung verschoben werden muss. Die wirkliche Dicke der Hülle muss mit der Grösse der inneren Luftreibung, d. h. der Reibung der in den tieferen Schichten zunehmend in ihrer Bewegung ge-

hemmten Luftmoleküle in einem bestimmten Verhältniss stehen. Vermuthlich übertrifft sie die berechnete Dicke einer unbeweglichen Hülle sehr ansehnlich, wofür auch andere bekannte Erscheinungen sprechen, deren Berücksichtigung uns indessen hier zu weit von unserem eigentlichen Stoff entfernen würde.

Über die Fallgeschwindigkeit von Windpollen konnte ich, mangels des nöthigen Materiales, zur Zeit keine Versuche anstellen. Der ausserordentlich flugfähige Pollen unserer Coniferen mit seinen Luftsäcken an den beiden Enden der ellipsoidischen Zellkörper wäre in Folge dieser blasenförmigen Anhängsel in einer Beziehung vielleicht richtiger zu der folgenden Gruppe von Flugorganen zu stellen, oder man müsste ihn als Mitteltypus zwischen unserer I. und II. Gruppe betrachten. Naturgemässer schliesst er sich aber vermöge seiner Kleinheit, welche die verdichtete oberflächliche Lufthülle bereits zur Wirkung kommen lässt, hier an.

Seine Transportfähigkeit durch Luftströmungen ist höchst bedeutend und allbekannt, wie die Thatsache des sogenannten „Schwefelregens“ beweist. Sie bildet in Folge des massenhaften Auftretens der Organe einen der seltenen Fälle, wo die Übertragung auf natürlichem Wege durch den Wind über grosse Strecken direkt nachweisbar ist. *)

Leistungsgrösse des Typus.

Einen allseitig genügenden, direkten Vergleich anzustellen zwischen der Leistungsgrösse der einzelnen Haupttypen der Flugorgane ist nicht wohl möglich. Die zu trans-

*) Ein neuestens vorgekommenes Beispiel bildet der in der Nacht vom 10. auf den 11. Mai 1886 in München und Umgegend gefallene „Schwefelregen“. Derselbe bestand aus Fichtenpollen. Nach Angabe des Herrn Direktor Lang, Vorstandes der meteorologischen Zentralstation, wehte damals ausschliesslich ganz leichter reiner Westwind. Die nächstgelegenen Waldbestände, aus welchen der Pollen möglicherweise stammen konnte, befinden sich in einer Entfernung von 8 Kilom. jenseits der Würm bei Pasing. Also hatte er mindestens über eine deutsche Meile zurückgelegt.

portirenden Lasten, wie die Mittel, durch welche die erhöhte Transportfähigkeit erzielt wird, lassen sich zum Theil kaum mit einander vergleichen. Nichts destoweniger schien mir ein Versuch, die Grösse der Leistungen der verschiedenen Typen oder wenigstens einzelner Beispiele aus denselben, auf einen einheitlichen Massstab zu beziehen und womöglich durch eine Zahl auszudrücken, von Interesse.

Es lassen sich natürlich solche Verhältnisszahlen auf verschiedenem Wege gewinnen. Man könnte beispielsweise den Koeffizienten ζ dazu benützen, indem man, absehend von seiner sonstigen Bedeutung als Verhältnisszahl für die Gestalt der Widerstandsfläche, in die Gleichung $\zeta = \frac{2\,g \cdot w}{\gamma\, f\, v^2}$, welche sich durch Umformung aus der Widerstandsgleichung ergibt, die für die einzelnen Flugorgane durch Messung und Versuche gewonnenen Grössen einführen würde. In den so erhaltenen Zahlen steckt dann die Summe der Resultate aller die Fallgeschwindigkeit beeinflussenden Momente, mögen sie auf der Gestalt der Widerstandsfläche oder der lebendigen Kraft beschleunigter Drehung oder sonst irgend etwas beruhen.

Einfacher ist es aber und das Resultat aller Einwirkungen springt noch mehr in die Augen, wenn man die beobachteten Fallgeschwindigkeiten ganz direkt mit den theoretischen vergleicht und daraus Verhältnisszahlen gewinnt. Ich will nun behufs dieser Vergleichung den Koeffizienten ζ ganz vernachlässigen (bezüglich ihn gleich 1 setzen) und mit der, der Formel $v = \sqrt{\frac{2\,g \cdot w}{\gamma\, f}}$ entsprechenden grössten theoretischen Fallgeschwindigkeit in die beobachtete grösste Fallgeschwindigkeit dividiren. Der Quotient ist dann die gewünschte Verhältnisszahl, welche ich die Fallverzögerung oder die „Leistungsgrösse“ nennen will.

Was hier unter „Leistungsgrösse“ verstanden wird, bezieht sich also nur darauf, um wie viel die wirkliche Fallgeschwindigkeit der Flugkörper von der theoretischen abweicht. Dabei ist ganz ausser Acht gelassen, dass in einem Fall relativ bedeutende Lasten, in anderen nur minimale

Körperchen bewegt werden müssen und dass bei bedeutenderer Leistungsgrösse dennoch die absolute Transportfähigkeit geringer sein kann, als bei minderer Leistungsgrösse.

Für die Leistungsgrösse der staubförmigen Flugorgane nun gibt uns Anhaltspunkte das Beobachtungsresultat an den Sporen von Lycoperdon caelatum. Deren grösste theoretische Fallgeschwindigkeit beträgt für $\zeta = 1$ 228 mm (vgl. S. 54). Die beobachtete Fallgeschwindigkeit macht dagegen nur 4,45 mm. Die Leistungsgrösse ist somit $\frac{228}{4{,}45} = 51$.

Von dem Momente an, mit welchem bei zunehmender Kleinheit der Organe der Einfluss der, die Oberfläche aller Körper überziehenden, verdichteten Lufthülle auf die Fallgeschwindigkeit überhaupt merklich wird, wächst die Leistungsgrösse fortdauernd. Bei den zunächst zu betrachtenden „körnchenförmigen Flugorganen", deren horizontaler Durchmesser im Mittel unter 1 mm bleibt, ist der Einfluss der Lufthülle noch unmerklich. Die Leistungsgrösse solcher Körper beträgt, wie wir später sehen werden, kaum mehr als 0,7. Mit der Abnahme des horizontalen Durchmessers steigt sie aber, wenn die Flugorgane einmal staubförmig geworden sind, sehr bedeutend an und erreicht bei den Lycoperdonsporen bei einem Durchmesser von $\frac{1}{270}$ mm die Grösse 51, also das 72 fache. Bei noch weiter abnehmendem Durchmesser muss diese Leistungsgrösse offenbar noch mehr anwachsen.

Mangels geeigneten Untersuchungsmaterials war ich zunächst nicht in der Lage, die Grenze oder Querschnittsgrösse, von welcher aus ein rascheres Anwachsen der Leistungsgrösse stattfindet, bestimmt feststellen zu können.

Das rasche Anwachsen der Verhältnisszahl mit dem Kleinerwerden der Körper kann im wesentlichen nur daran liegen, dass die Dicke der verdichteten Lufthülle von der molekular wirkenden Oberflächenattraktion abhängt. Man kann sich das Verhalten am einfachsten klar machen, wenn man die, ebenfalls auf Molekularattraktion beruhende Anziehung des Wassers durch Glasoberflächen betrachtet. Be-

rührt man mit der Zylinderfläche zweier massiver zylindrischer Glasstäbe von sehr verschiedener Dicke, z. B. einem von 100 und einem von 1 mm Durchmesser, vorsichtig eine Wasseroberfläche, so steigt das Wasser an der Oberfläche des dünneren Zylinders fast ebenso hoch an, als an derjenigen des dickeren, resp. man kann bei grosser Vorsicht die Stäbe nahezu gleichweit über die Wasserfläche erheben, ohne dass eine Trennung der adhärirenden Wassertheilchen von der übrigen Wassermasse stattfindet, obschon die Masse des dickeren Stabes die des dünneren um das 10000 fache übertrifft. Der relativ geringe Unterschied in der Attraktionsgrösse beruht eben nicht etwa auf dem Massenunterschied der Glasstäbe, sondern ausschliesslich auf dem verschiedenen Radius der anziehenden Oberflächen, wie daraus hervorgeht, dass das Wasser an einer dünnwandigen zylindrischen Glasröhre von gleichem Radius der äusseren Oberfläche genau die gleiche Höhe erreicht. Gerade so muss die Dicke der Lufthülle unter sonst gleichen Verhältnissen (bei gleicher Temperatur, gleicher chemischer Zusammensetzung und gleicher Gestalt der Körper) wesentlich von dem Krümmungsradius der Oberfläche abhängen, und zwar muss sie, entsprechend dem Adhäsionswinkel des Wassers an verschieden stark gekrümmten Glasflächen, im Verhältniss sehr viel weniger abnehmen, als der Krümmungsradius. Sie nimmt also im Verhältniss zur horizontalen Projektionsfläche des Körpers selbst zu und es wächst damit, wenn die vertikale Durchschnittshöhe der Körper die gleiche bleibt, der beim Fall zur Ausnützung des Luftwiderstandes wirksame Gesammtquerschnitt des Körpers im Verhältniss zu seiner Masse immer mehr. Mit der Grösse des wirksamen horizontalen Querschnittes steht aber die Grösse des Luftwiderstandes beim Fall und damit die Leistungsgrösse des Körpers in einem geraden Verhältniss. Nachdem nun, wie wir gesehen haben, die Grösse der wirksamen horizontalen Gesammtprojektionsfläche zur Grösse der Horizontalprojektion des Körpers allein in einem umgekehrten Verhältnisse steht, so steht nothwendigerweise auch die Leistungsgrösse in einem umgekehrten Verhältniss zu der Grösse der Horizontalprojektion desselben.

Um das Gesetz dieses Verhältnisses feststellen zu können, wäre eine grössere Reihe von ähnlich ausgeführten Fallversuchen mit sorgfältig ausgewählten Sporen von gleicher Gestalt, gleichem spezifischen Gewicht und verschiedener Grösse nöthig, vorausgesetzt, dass die Zusammensetzung der Lufthüllen der verschiedenen Sporen die gleiche ist und dass die Kraft, mit welcher sie von den Oberflächenelementen der Sporen angezogen wird, bei allen gleich gross ist.

Zur Mechanik der Fallbewegung.

So klein und leicht die Flugkörper dieser Kategorie auch sein mögen, in absolut ruhiger Luft fallen sie, wenn sie vollkommen rund sind und ihre Massevertheilung regelmässig ist, so dass der Schwerpunkt mit dem geometrischen Mittelpunkt der Kugel zusammenfällt, in lothrechter Fallbahn ohne Drehung zur Erde nieder. Liegt der Schwerpunkt nicht im geometrischen Mittelpunkte, so werden Drehungen stattfinden. Der Körper wird sich in's Gleichgewicht zu stellen suchen, indem der schwerere Theil voraus eilt, oder richtiger, indem der Luftwiderstand den leichteren Theil nach rückwärts dreht. Die seitlichen Abweichungen exzentrischer kugeliger Körper ohne besonderen Drehimpuls sind jedoch sehr gering und kommen so gut wie nicht in Betracht. Homogene kugelige Körper befinden sich in jeder Lage im indifferenten Gleichgewicht. Die Gleichgewichtslage excentrischer kugeliger Körper ist dagegen stabil.

Die zylindrischen Organe müssten eigentlich gesondert betrachtet werden, indem hier bedeutendere Drehungen vorkommen, auch wenn der Schwerpunkt im geometrischen Mittelpunkt liegt. Sie haben unter Umständen eine bestimmte Gleichgewichtslage, welche sie einzunehmen suchen.

Der Widerstand, welchen sie der Luft leisten, ist grösser als der der kugeligen Körper von gleichem Inhalt. Schon der einer Kugel gleicher Masse im Volum gleiche Zylinder von kleinster Oberfläche, der Kugelzylinder, besitzt eine um das 1,14fache grössere Oberfläche als die Kugel, und seine Flächen besitzen ausserdem, wie früher bereits ausgeführt, bedeutend höhere Widerstandscoeffizienten. Bei stärker

in der Richtung ihrer Axe verlängerten oder in der Richtung ihrer Grundflächen verbreiterten Zylindern gleicher Masse wächst aber die Oberfläche bedeutend an. Das Verhalten ersterer Körper schliesst sich den haarförmigen, das der letzteren den scheibenartigen an. Die Gleichgewichtslage der ersteren wird mit zunehmender Verlängerung immer stabiler, diejenige der letzteren ist labil, wie die der kurzzylindrischen.

Mit sehr leichten aus Papier hergestellten hohlen Modellen lässt sich das geschilderte Verhalten sehr leicht prüfen. Auf die Mechanik der vorkommenden Drehungen will ich aber hier um so weniger eingehen, als ich ohnehin bei den ihrer Gestalt nach als Flugkörper konstruirten Organen, welche die Extreme der Ausbildung in entgegengesetzter Richtung darstellen, darauf zurückkommen muss. Für die Fallgeschwindigkeit haben diese Drehungen kaum Bedeutung. Es sind Drehungen, welche bei der geringen Masse der Körper und ihrer enormen Lufthülle durch die höchst bedeutende Reibung nur sehr langsam von Statten gehen können. *)

*) In Betreff sonstiger Nachweise der für die Fallverzögerung der kleinsten organischen Körper so wesentlichen, von mir mit Nägeli angenommenen verdichteten Lufthülle, sowie der einschlägigen physikalischen Litteratur, will ich in Kürze nur folgendes bemerken. Waidele's Versuche zur Erklärung der Moser'schen Hauchbilder (Poggend. Ann. Bnd. 59) beweisen, abgesehen von zahlreichen anderen Thatsachen, unwiderleglich die Existenz solcher verdichteter Gashüllen auf der Oberfläche fester Körper. In Betreff ihrer Dimensionen geben sie freilich keine sicheren Anhaltspunkte, indessen sprechen sie gleichwohl für eine ansehnliche Dicke, wenn auch manche der betreffenden Beobachtungen vielleicht auf andere Art erklärt werden können. Nicht unwahrscheinlich spielt neben der Molekularattraktion die chemische Affinität eine wesentliche Rolle bei der Zusammensetzung und Grösse derselben. Quincke („Über die Verdichtung von Gasen und Dämpfen auf der Oberfläche fester Körper" in Poggend. Ann. Bnd. 108 pag. 326) zieht die allgemeinsten Schlussfolgerungen aus den von Moser, Waidele und anderen gelieferten Thatsachen.

Es liessen sich gerade durch den obigen analoge, ausgedehnte Fallversuche mit sehr kleinen Körperchen aus verschiedenen Stoffen, in gewöhnlicher Luft wie in verschiedenen Gasarten, Anhaltspunkte für die Zusammensetzung sowie die (wenigstens relative) Dicke der Gashüllen gewinnen.

II. Haupttypus.

Die körnchenförmigen Flugorgane.

(Taf. I, Fig. II u. Taf. II, Fig. 2. vgl. Fig.-Erkl.)

Kleine Körper von verschiedenem Umriss, bald ganz isodiametrisch kugelförmig, bald zylindrisch, von mehr stäbchenförmiger bis mehr plattenförmiger Gestalt variirend oder endlich mehr oder weniger unregelmässig. Besondere Apparate zur Ausnützung des Luftwiderstandes fehlen. Ihre Fähigkeit, vom Winde getragen zu werden, liegt nur in der Kleinheit der Organe, nämlich in der relativ zur Masse vergrösserten Oberfläche. Die Lufthülle übt keinen sehr wesentlichen Einfluss mehr aus. Die ganz typischen (isodiametrischen) Organe drehen nicht und besitzen indifferente Gleichgewichtslage. Die Fallgeschwindigkeit ist relativ bedeutend. Sie entspricht bei gleicher Masse der Grösse und Gestalt der horizontalen Projektionsfläche resp. der Widerstandsfläche der Körper. Die Bewegung des Schwerpunktes in ruhiger Luft ist typisch eine geradlinige senkrechte.

Beispiele: Früchtchen von Sibbaldia procumbens. Samen von Papaveraceen, Orobancheen, manchen Caryophylleen, Bromeliaceen etc.

Der Schwerpunkt der Körper liegt mehr oder weniger median. Ihr Inhalt überschreitet nicht einen Cubikmillimeter.

Drehungen kommen vor, spielen jedoch bei den typischen, mehr isodiametrischen Formen keine irgendwie wesentliche Rolle. Die Mechanik des Verhaltens schliesst sich enge an die der I. und III. Gruppe an. Die Fallbeschleunigung ist bereits ziemlich bedeutend und bei den grösseren und mehr isodiametrischen Formen, wie beispielsweise bei den nierenförmigen Samen des Mohnes, nähert sich die Geschwindigkeit der für „Flugorgane“ zulässigen Grenze.

Ihre Fallverzögerung gegenüber grösseren Körpern gleicher Gestalt beruht auf der mit dem Kleinerwerden relativ zur Oberfläche, respektive zur Projektionsfläche abnehmenden Masse. Bei kugeliger Gestalt nimmt die Projektionsfläche mit der Quadratwurzel, der Inhalt dagegen mit der Kubikwurzel ab. Andererseits ist der Durchmesser der hieher gehörigen Organe aber bereits zu bedeutend, als dass der verdichtete Luftmantel noch eine grössere Rolle bei der Ausnützung des Luftwiderstandes spielen könnte, wenn er auch bei kleineren und namentlich bei verlängert stäbchenförmigen Organen nicht ganz unwesentlich sein kann.

Samen von Papaver somniferum.

Kleine etwas zusammengedrückt bohnen- oder nierenförmige Körper mit meist bienenwabig-grubiger Oberfläche. Das eine Längsende pflegt etwas breiter und dicker als das andere zu sein. Sie messen in ihren grösseren Formen im Durchschnitt 1,5 mm grösste Länge, 1 mm grösste Breite und $^2/_3$ mm grösste Dicke.

Ein Exemplar, welches genau diese Dimensionen besass, wog, entsprechend dem Durchschnitt aus 13 ausgesuchten, möglichst gleichgrossen Samen 0,554 mgm.

Beim Fall eilt das dickere Ende etwas voraus und zwar stellt sich die Längsaxe in einen Winkel von etwa 45^0 zur horizontalen, so dass der Rücken etwas nach abwärts geneigt, die konkave Bauchseite des Samens dagegen etwas nach aufwärts gedreht ist. In dieser Stellung stellte die grösste Querschnittsfläche des genannten Samens eine Ellipse dar von $^7/_6$ mm grosser und $^1/_6$ mm kleiner Halbaxe. Der Flächeninhalt berechnet sich also nach der Formel für die Quadratur der Ellipse

$$E = a.\ b.\ \pi$$

worin a die grosse und b die kleine Halbaxe bedeuten, mit

$$E = \frac{7}{12} \cdot \frac{1}{3} \cdot 3{,}1415$$

$$E = 0{,}6108 \text{ qmm.}$$

Der Same durchfiel, gerade so wie sämmtliche andere 13 geprüfte Exemplare 6 m Fallhöhe in 1,8 Sek. und zwar den

1. m in 0,5 Sek.
2.—3. m „ 0,7 Sek. also je 1 m in 0,35 Sek.
4.—6. m „ 0,6 Sek. „ „ „ „ „ 0,2 Sek.

0,2 Sek. auf 1 m entspricht einer Geschwindigkeit von 5 m in der Sekunde. Wenn letztere Geschwindigkeit auch noch nicht die allergrösste erreichbare ist, so muss sie doch nahe an dieselbe herankommen. Fügen wir die Grössen für Gewicht und Projektionsfläche in die Formel zur Berechnung der theoretischen Fallgeschwindigkeit ein, und bemessen den Widerstandskoeffizienten 3 für die vom Luftwiderstand getroffene Fläche schätzungsweise (wahrscheinlich etwas zu niedrig) mit 0,5 analog demjenigen der Kugelfläche, so erhalten wir

$$v = \sqrt{\frac{19620 \cdot 0{,}554}{0{,}001293 \cdot 0{,}6108 \cdot 0{,}5}}$$

$$v = 5247 \text{ mm.}$$

Die theoretische gleichförmige Geschwindigkeit würde demnach, wenn $3 = 0{,}5$ wäre, um $\frac{1}{11}$ über die beobachtete grösste Geschwindigkeit hinausgehen. Wahrscheinlich geht die wirkliche grösste Fallgeschwindigkeit noch etwas darüber. Immerhin stimmt das Resultat der Berechnung mit dem Beobachteten ganz gut.

Die Mohnsamen sind übrigens ziemlich ungleich gross. Die kleineren, sonst ebenfalls gut ausgebildeten Formen zeigen z. B. nach einem typischen ausgewählten Exemplar eine Länge von 1,06, eine Breite von 0,8 und eine Dicke von 0,66 mm. Das Gewicht betrug in diesem Fall 0,344 mgm und die Projektionsfläche 0,4665 qmm. Die Fallzeit dieser Samen betrug für den 4. bis 6. m Fallhöhe im Durchschnitt 0,26 Sek. pro Meter, also die Geschwindigkeit in der Sekunde 3,8 m.

Ausser den wabig grubigen kommen endlich ausnahmsweise noch Samen mit ganz oder fast glatter Testa vor. Nach einigen für ein ganz bestimmtes Urtheil freilich nicht genügenden Versuchen, scheint es als ob diese merklich rascher fallen, als sie es vermöge ihres Gewichtes und ihrer Dimensionen theoretisch thun sollten. Sechs gleichgrosse glatte Samen wogen im Durchschnitt 0,483 mgm, die Projektions-

fläche betrug bei einem genau gemessenen Exemplar 0,5236 qmm und die Fallgeschwindigkeit war genau die gleiche wie bei den grossen grubigen Samen. Es läge nun nahe, zu denken, dass die rauhe Oberfläche dieser, wie vieler anderer kleinen Samen dem Luftwiderstand um so mehr zu erleichtertem Angriff dienen könnte, als die vorspringenden Leisten zwischen den Grübchen durch den verdichteten Luftüberzug noch weiter erhöht werden. Indess habe ich bis jetzt nicht genug Versuche anstellen können, um mehr als die Möglichkeit solchen Verhaltens anzunehmen. Von sonstigen biologischen Funktionen dieser Oberflächenskulptur könnte man höchstens noch an die leichtere Benetzbarkeit der rauhen Oberfläche durch Wasser denken.

Samen von Pitcairnia flavescens (Bromeliac.).

Die Samen stellen 3—4 1/2 mm lange Stäbchen dar, welche an beiden Enden lang zugespitzt sind. Dieselben bestehen aus einem walzlich-spindelförmigen Nüsschen, welches meist 1 1/2 mm lang und 1/5 mm dick ist und an dessen beiden Enden sich ein 3/4—1 1/2 mm langer, allmählich zugespitzter, kurzer borstenförmiger Fortsatz ansetzt.

Ein Exemplar von mittleren Dimensionen fiel 3 Meter in 4,2 Sek. herab, davon den

1. m in 1,6 Sek.
2. „ „ 1,47 „
3. „ „ 1,24 „

Welche weitere Beschleunigung eintritt, konnte ich wegen anfänglichen Mangels eines entsprechend höheren Fallraumes nicht sicher konstatiren, voraussichtlich dürfte aber die gleichförmige Fallgeschwindigkeit nicht unter 1 m auf 1,1 Sek., also pro Sekunde fast 1 m betragen.

Es bilden diese Samen gewissermassen schon einen Übergang zu den haarförmigen, indem die Länge bedeutend überwiegt. Ihre Fallgeschwindigkeit diesen gegenüber ist aber eine sehr beträchtliche. Unter den körnchenförmigen ist dieselbe dagegen eine relativ geringe.

Leistungsgrösse des Typus.

Die beobachtete Fallgeschwindigkeit der Mohnsamen beträgt 5 m in der Sekunde. Die theoretische Fallgeschwindigkeit, wenn $\zeta = 1$ ist, beträgt 3709 mm, also ist die Leistungsgrösse $\frac{3709}{5000} = 0{,}74$. Im Falle eine andere Widerstandsfläche vorhanden wäre, speziell die günstigste hier denkbare, eine ebene Fläche von gleichem Inhalt, wie der berechnete Querschnitt, könnte die Leistungsgrösse bis auf etwa 1,15 steigen. *) Indessen ist diese Möglichkeit sehr wenig wahrscheinlich und es dürfte in Wirklichkeit kaum die Zahl 1 erreicht werden. Entsprechende Leistungsgrössen müssen alle hierhergehörigen Flugorgane besitzen. Erst unter einer gewissen Grösse wird sich dann schliesslich der Einfluss der verdichteten Lufthülle bemerklich machen, ebenso bei länger zylindrischer oder dünner plattenförmiger Gestalt die Wirkung der lebendigen Kraft etwaiger beschleunigter Drehungen.

*) Der berechnete Mohnsamen würde mit dem Koeffizienten $\frac{4}{3} = 1{,}33$ (für die ebene Widerstandsfläche) ca. 3212 mm in der Sekunde durchfallen, also die Leistungsgrösse $= \frac{3709}{3212} = 1{,}15$ betragen.

III. Haupttypus.

Die blasig aufgetriebenen Flugorgane.

(Taf. I, Fig. III, 1.—3. und Taf. II, Fig. 2. Vgl. hiezu Fig.-Erkl.)

Im Umriss mehr oder weniger kugelige oder annähernd isodiametrische Körper, welche innerhalb ihrer äussersten, geschlossenen oder durchbrochenen Umgrenzungsfläche kleinere oder grössere luftgefüllte Hohlräume enthalten. Das spezifische Gewicht der ganzen Körper ist dadurch ein relativ geringes. Die Vergrösserung der betreffenden Organe wird ohne wesentliche Gestaltsveränderung erzielt mittelst blasiger oder schwammiger Auftreibung der Körper selbst oder durch Umhüllungen verschiedener Art: durch auswachsende Blüthen- oder Fruchthüllen, durch den gesammten, beim Vertrocknen sich einrollenden oberirdischen Pflanzenstock oder einzelne Theile desselben, endlich sehr häufig durch allseitige dichte Besetzung mit bald einfachen bald gefiederten, strahlig abstehenden, oder mit gekräuselten und verfilzten Haaren. Die ganz typisch gestalteten (isodiametrischen) Formen drehen nicht und besitzen mehr oder weniger indifferente Gleichgewichtslage. Auch wo Drehungen vorkommen, haben dieselben keinen Einfluss auf die Fallgeschwindigkeit. Die Fallgeschwindigkeit entspricht bei gleicher Masse der Grösse und Gestalt der horizontalen Projectionsfläche, resp. der Widerstandsfläche. Es gilt dies mehr oder weniger auch für die Organe mit durchbrochenen Umgrenzungsflächen. Die Fallbewegung des Schwerpunktes in ruhiger Luft ist eine geradlinige senkrechte.

Hierher gehörige Beispiele: Blasig vergrösserte Früchte von Valerianellaarten. Schwammig vergrösserte Früchte von Atriplex inflata. In eine dünnhäutige lufterfüllte Hülle eingeschlossene Samen der Orchideen. Durch schwammiges

Anhängsel vergrösserte Samen von Aristolochia Sipho. Mit blasiger Cupula umhüllte Frucht von Ostrya. Mit aufgeblasenem Kelch umhüllte Früchte sehr vieler Pflanzen, beispielsweise vieler Papilionaceen (allein gegen 150 Astragalus-Arten). Von stehen bleibenden behaarten Stielen unfruchtbarer Blüthen umhüllte Fruchtstände von Rhus Cotinus. Beim Vertrocknen kugelig zusammengerollte, den Fruchtstand einhüllende ganze Pflanzen von Anastatica hierochuntica. Compositenfrüchte mit allseitig strahlenden Pappushaaren, welche im Umriss kugelige Körper darstellen, wie die Achenen von Cynara Scolymus. Durch allseitig strahlig abstehende lange Seidenhaare vergrösserte Samen von Comesperma (Polygal.). In ein Wollknäuel gehüllte Samen von Gossypium (Malvac.), Ochroma (Bombac.) etc.

Der Schwerpunkt der Körper liegt median oder auch mehr oder weniger exzentrisch. Die Organe bieten, wenigstens was ihre äussere Umgrenzungsform anlangt, mechanisch kein besonderes Interesse. Der Vorgang während des Falles durch die Luft ist sehr einfach und im Allgemeinen der gleiche wie bei den oben besprochenen Formen der I. Gruppe. Es sind spezifisch leichte Körper, welche im Verhältniss zu ihrer Masse und ihrem Gewicht dem Winde eine grosse, mehr oder weniger kugelförmige Angriffsfläche darbieten. Die Ungunst dieser Oberflächengestalt ist ausgeglichen durch die Grösse der Angriffsfläche im Verhältniss zur Körpermasse. Die Abstufungen in der Transportfähigkeit sind sehr bedeutend. Es hängt diess von der Grösse der durch die äusseren Begrenzungsflächen mit eingeschlossenen lufterfüllten Räume im Verhältniss zur Gesammtmasse der Körper ab.

Die zusammengerollten ganzen Pflanzen sind nicht eigentlich als Flug- sondern viel eher als Rollkörper zu betrachten, welche der Wind über die kahlen Flächen der sie beherbergenden heissen trocknen Steppenländer hinrollt, bei aufsteigender Richtung und grösserer Stärke freilich stellenweise auch trägt. Die Mechanik ihrer Bewegung ist die der rollenden Kugel.

Es hat kein besonderes Interesse, auf das Verhalten der

hieher gehörenden Organe typischer Gestalt mit geschlossener Umgrenzungsfläche im Einzelnen einzugehen. Das Mass ihrer Leistungsfähigkeit zur Ausnützung des Luftwiderstandes wird bei Einfügung des entsprechenden Coeffizienten durch Gewicht und Projektionsfläche annähernd richtig wiedergegeben und bietet mechanisch nichts besonders bemerkenswerthes.

Anders ist es aber mit den Körpern ohne geschlossene Grenzflächen wie gewissen haarumhüllten kugeligen Früchten und Samen. Deren Verhalten will ich an einem Beispiel, dem der Achenen von Cynara Scolymus, erläutern. Man könnte derartige Formen auch als besonderen Typus betrachten. Die Angriffspunkte für den Luftwiderstand sind hier vervielfältigt und sind vertheilt durch das ganze Innere des kugeligen Raumes. Dabei haben die einzelnen Flächenelemente die allerverschiedensten Stellungen zum Luftwiderstande. Aber jedem einseitig schiefen Flächenelement entspricht ein anderes antagonistisch wirkendes, so dass bei einer grossen Zahl regelmässig angeordneter Strahlen auch hier, gerade wie bei der homogenen Kugel mit geschlossener Oberfläche, in jeder Lage zum Luftwiderstand die Summe aller statischen Momente gleich Null sein muss. In Folge dessen befindet sich der Körper immer im indifferenten Gleichgewichte, vorausgesetzt, dass der Schwerpunkt geometrisch genau in den Mittelpunkt fällt. Andererseits ist die Stabilität in Bezug auf drehende Kräfte gering. Auch wo Drehungen vorkommen, spielen sie keine irgendwie wesentliche Rolle.

Es kommt bei den aus Haaren gebildeten Hüllen noch der sehr wesentliche, schon von Kerner in seinem Aufsatze „über die Verbreitung der Samen im Hochgebirge“ vermuthungsweise ausgesprochene Umstand hinzu, dass hier, wie bei den staubförmigen Flugorganen, die verdichtete Lufthülle, welche an der Oberfläche haftet, den wirksamen Querschnitt vergrössert, indem sie eine für den Luftwiderstand grössere Angriffsfläche erzeugt.

Ausserdem ist die Luftmasse, welche sich zwischen diesen luftüberzogenen Haaren befindet, je nach der Dichte der Haarhülle mehr oder weniger unbeweglich und wirkt

auf diese Art ebenfalls als flächenvergrössernd bei der Fallverzögerung mit. Gerade hierin ist die nahe Beziehung zu den ganz typischen, mit geschlossener Hülle umgebenen Organen vorliegender Gruppe gegeben.

Dass die Lufthülle der haarförmigen Flugapparate übrigens wirklich einen bedeutenden Einfluss besitzt, geht, abgesehen von dem Verhalten der staubförmigen Organe, aus Versuchen hervor, welche ich mit den Samen der Bromeliacee Pitcairnia imbricata angestellt habe und über welche bei der IV. Gruppe von Flugorganen, den haarförmigen, berichtet werden wird.

Achenen von Cynara Scolymus.

Die reifen trockenen Früchte stellen im Umriss kugelförmige Körper dar, welche durch nach allen Richtungen strahlende gefiederte Haare gebildet werden. Der Durchmesser einer solchen strahligen Kugel einer zu den Fallversuchen benützten gut entwickelten Frucht betrug bis zu den äussersten Enden der Strahlen gerechnet 62 mm, nachdem aber die Strahlen nicht ganz bis zur Spitze gefiedert sind, bis ans Ende dieser Fiederung 50 mm. Die Nuss, ein von zwei Seiten etwas zusammengedrückter länglich eiförmiger Körper, welcher an seiner Spitze den Pappus trägt, befand sich etwa im unteren Drittel der Kugel und in Folge dessen auch der Schwerpunkt in ähnlicher, etwas mehr dem Mittelpunkt genäherter Lage. Die vertrocknete lange Blüthe bleibt dauernd auf der Frucht stehen und überragt die Pappushaare.

In Folge der tiefen Lage des Schwerpunktes besitzt das Organ beim Fall eine ziemlich stabile Stellung. Kleine Drehungen, welche aber nur zu geringen seitlichen Neigungen führen, kommen gleichwohl meist vor.

Die ganze benützte Frucht wog 0,0443 grm, wovon auf die Nuss allein 0,0273 und den Pappus 0,017 grm trafen. Das Volumen der Nuss betrug $\frac{0{,}0273}{1{,}5} = 18{,}2$ cmm, und durch den Pappus wurde das Volumen des ganzen Organs

mit dem geringen Materialaufwand von 0,017 grm auf das Volumen einer Kugel mit einem Radius von 25 mm vergrössert. Da der Kugelinhalt $\frac{4}{3} r^3 \pi$ beträgt, so beträgt der Inhalt der ganzen Frucht 65,437 ccm und das Volumen der Nuss ist somit durch den Pappus um das $\frac{65437}{18,2} =$ 3590fache vergrössert. Wenn wir das Material des Pappus als dem der Nuss spezifisch gleichgewichtig annehmen, sind die 0,0443 grm des gesammten Materials, welche 29,5 cmm Volumen entsprechen, auf einen 2255mal so grossen Raum vertheilt und das spezifische Gewicht der ganzen Kugel, welche neben 29,5 cmm organischer Materie 65407,5 cmm Luft in sich schliesst, setzt sich zusammen aus dem Gewicht des der ganzen Kugel gleichen Volumens Wasser, dividirt in die Summe des Gewichts der organischen Materie plus dem Gewichte der ausserdem darin enthaltenen Luft. Da 65407,5 cmm Luft 0,0845 grm wiegen und 65437 cmm Wasser 65,437 grm, so haben wir also $\frac{0,0443 + 0,0845}{65,437} = 0,001968$ als spezifisches Gewicht der durch die Pappusstrahlen gebildeten Kugel. Die Kugel wiegt demnach nur um c. $^1/_3$ mehr, als das gleiche Volumen atmosphärischer Luft.

Die beobachteten Fallzeiten waren folgende:

6 m Fallraum wurden durchfallen in 8,4 Sek. und zwar der

1. m in 1,6 Sek.
2. „ „ 1,5 „
3. „ „ 1,4 „
4.—6. „ „ 3,9 „

In diesen letzten 3 m war also die durchschnittliche Fallzeit 1,3 Sek. und man kann annehmen, dass die Fallzeit nicht unter 1,2 Sek. pro Meter sinkt. Diess macht für die Sekunde Fallzeit eine Geschwindigkeit von 83,3 cm.

Fügen wir diese Geschwindigkeit, ferner das Gewicht des ganzen Organs mit 44,3 mgm, und endlich die Projektionsfläche des Organs, welche dem Inhalt des grössten Kugelkreises gleich ist, somit $r^2 \pi = 25^2 \cdot 3,1415 = 1963$ qmm beträgt, in die früher entwickelte Gleichung zur Berechnung des Luftwiderstandes ein, so bekommen wir für

$$w = \gamma f \frac{v^2}{2g} = 0{,}001293 \cdot 1963 \cdot \frac{830^2}{19620}$$

$$w = 89{,}11 \ldots \text{ mgm.}$$

Der Widerstand, welchen die Luft dem gleichmässig fallenden Organ entgegensetzt, beträgt somit fast genau das Doppelte seines Gewichtes, welches 44,3 mgm ausmacht und entspricht seinem Gewichte selbst, wenn wir den Erfahrungskoeffizienten $3 = 0{,}5$, welcher für die Kugelfläche gilt, einführen. Umgekehrt entspricht die theoretische Geschwindigkeit fast genau der beobachteten.

Es ist dies Zusammentreffen ein geradezu überraschendes, denn es ist doch der Vorgang im Einzelnen ein etwas anderer als bei der geschlossenen Kugelfläche, wo ausschliesslich seitlicher Abfluss der Luft stattfindet. Ein Theil der Luft strömt in unserem Falle wohl ebenfalls nach den Seiten ab, doch dringt zweifellos der grösste Theil in die Kugel selbst ein, indem er theilweise erst im Innern zu seitlichem Abfluss gezwungen wird. Es muss das um so mehr der Fall sein, nachdem in dem untern Theil der kugeligen Hülle eine etwas grössere kegelförmige Lücke vorhanden ist, deren Scheitel die Nuss einnimmt. Dieselbe stellt sogar eine Andeutung einer konkaven Widerstandsfläche dar.

Die Zahl der Pappusstrahlen, welche aus etwas verbreiterter, flacher Basis sich allmählig bis zu Haardünne verschmälern, betrug im vorliegenden Falle 105; ihre Länge schwankte von 30 mm (unterste ganz zurückgeschlagene) bis zu 38 mm (oberste, fast senkrecht aufgerichtete, welche die vertrocknete Blüthe umgaben). Die Fiederung reichte bei Allen von der Basis bis zu einer Länge von c. 26—27 mm, so dass die untersten Strahlen fast bis zur Spitze, die obersten kürzer gefiedert waren. Die ausserordentlich feinen zylindrischen Fiederhärchen, welche im Mittel 0,0074 mm dick sind, haben im untern und oberen Drittel des Strahles c. $2^1/_2$ mm und im mittleren Drittel c. $5^1/_2$ mm Länge und stehen im Durchschnitt etwas weniger als $^1/_2$ mm auseinander, so dass auf jede Strecke von 5 mm jederseits 11 Fiederhärchen kommen. Die Zahl dieser Fiederhärchen ist somit sehr bedeutend und sie erfüllen als feines Netzwerk das ganze Innere der Kugel. Nach einer Berechnung welche ich an-

gestellt habe, fanden sich 11235 solcher Fiedern in der vorliegenden Frucht und alle zusammengenommen repräsentirten eine Länge von nicht weniger als beiläufig 39 m. Ihr Gesammtvolumen (J) beträgt dabei, nachdem der Radius der zylindrischen Organe 0,0037 misst, nach der Formel $r^2 \pi h$, worin $r^2 \pi$ die Grundfläche und h die Höhe des Zylinders bedeutet

$$J = 0{,}0037^2 \cdot 3{,}1415 \cdot 39000$$
$$J = 1{,}677 \text{ cmm.}$$

Die verdichtete Lufthülle dieser Haare misst mindestens ebensoviel, sicherlich sogar mehr, als die Lufthülle der halb so dicken Lycoperdonsporen, welche zu 0,1345 berechnet worden war. Nehmen wir sie als unbeweglich und ebenso dick an, so hätten wir für den Radius eines Haares sammt Lufthülle die runde Zahl 0,1382 mm. Hieraus berechnet sich der Inhalt eines Zylinders von 39 m Länge zu 540 cmm. Es würde danach durch die feinen Fiederhärchen mit ihrer Lufthülle ein ziemlich ansehnlicher Theil des Gesammtvolumens des Organs in Anspruch genommen und so ein überaus leichtes durch den ganzen Innenraum der Hohlkugel vertheiltes Gerüst hergestellt, welches auch die Beweglichkeit der dazwischen befindlichen, nicht verdichteten Luftmasse in sehr bedeutendem Grade hemmt. Abgesehen von dem als Druck wirkenden direkten Widerstand, welchen die von der bewegten Luft getroffenen Flächen leisten, muss eine sehr ansehnliche Reibung der zwischen den Haaren durchströmenden Luft erzeugt werden. Die mehr weniger quer zur Bewegungsrichtung stehenden Haare werden direkten Widerstand leisten, die in die Bewegungsrichtung fallenden werden wesentlich Reibungswiderstand erzeugen.

Trotz aller dieser Unterschiede in den Einzelheiten des Vorganges ist das Gesammtresultat bei den Achenen von Scolymus dennoch genau dasselbe, als ob das Organ bei gleichem Gewicht eine geschlossene kugelige Hülle von 25 mm Radius besässe.

In Fällen, wo die nach allen Seiten strahlenden Haare noch dichter stehen, wie hier, beispielsweise bei den Samen von Comesperma, wird die Unbeweglichkeit der Luftmasse zwischen den Haaren fast vollkommen sein. Der gesammte

Nutzeffekt ist aber in beiden Fällen der gleiche und entspricht beim Fall dem einer Kugel mit geschlossener Oberfläche. Auf der Oberfläche muss in Folge ihrer Unebenheit erhöhter Reibungswiderstand der seitlich abgleitenden Luftströme entstehen, welcher, soweit dabei in die Bewegungsrichtung fallende Komponenten erzeugt werden, die Grösse des Gesammtluftwiderstandes etwas erhöht. Ebenso wirken Überzüge von dichter stehenden gekräuselten oder verfilzten Wollhaaren. Sie nähern sich im Einzelverhalten noch mehr den Körpern mit geschlossener Oberfläche.

Leistungsgrösse des Typus.

Die Leistungsgrösse ist bei den typischen Formen dieselbe oder sehr nahekommend derjenigen des vorigen Typus. Für die Organe mit geschlossener Umgrenzungsfläche versteht sich dies nach dem bisherigen ganz von selbst. Für die Organe mit durchbrochener Umgrenzungsfläche trifft es aber auch zu, wenn die Durchbrechungen oder Lücken nicht allzu gross sind. Für Cynara Scolymus fanden wir so die wirkliche grösste Fallgeschwindigkeit gleich 833 mm. Die berechnete Fallgeschwindigkeit für $\zeta = 1$ ergibt 585 mm, also beträgt die Leistungsgrösse $\frac{585}{833} = 0{,}7$. Es erscheint fraglich, ob bei derartigen Formen die Leistungsgrösse noch beträchtlicher steigerbar ist. Vielleicht ist eine kleine Steigerung bei etwas dichterem Schluss der Haarhülle möglich. Wird aber eine gewisse obere Grenze der Dichtigkeit überschritten, so muss die zwischen den Haaren befindliche Luft zu unbeweglich werden und die Leistungsgrösse sinkt wieder gegen 0,7 herab.

Zur Mechanik des Rollens.

Es haben die Körper dieser Gruppe zum Theile weniger die Funktion von Flug- als von Rollorganen, welche der Wind über den Boden hinwälzt. Charakteristisch ist, dass eine auffallend grosse Zahl derselben den warmen

trockenen Steppenländern angehört, wo der Boden nur mit zerstreuten Einzelgewächsen, und nicht mit zusammenhängender Vegetationsdecke bekleidet ist. Damit ist natürlich nicht ausgeschlossen, dass sie, wie alle leichten Körper, bei stärkerem Winde zeitweilig auch wirklich „fliegen".

Was die Bedingungen der beschleunigt fortschreitenden Bewegung des Rollens auf ebenem Boden, unter der Einwirkung einer andauernden Kraft anlangt, so verhält sich die Sache, um den mechanischen Vorgang im einfachsten Falle wenigstens andeutungsweise zu berühren, folgendermassen:

Nehmen wir an, der einseitig auf ein kugeliges Organ mit zentrischem Schwerpunkt wirkende Druck der über den Boden hinstreichenden bewegten Luft träfe in horizontaler Richtung und mit dauernd gleicher Stärke die entsprechend gerichteten Flächentheile des Organs. Es wird dann die verlängerte Resultirende aller Drücke in horizontaler Richtung durch den Schwerpunkt des Körpers gehen und diesem eine Beschleunigung in der Richtung dieser Resultirenden ertheilen.

Dieser Kraft wirkt entgegen der Widerstand der rollenden Reibung, welcher sich zusammensetzt aus dem Produkte des senkrechten Druckes des rollenden Körpers auf seine Unterlage (also seines Gewichtes) in den Koeffizienten der rollenden Reibung. Überhaupt findet Rollen immer nur dann statt, wenn die gleitende Reibung eine so bedeutende Grösse erreicht, dass die Geschwindigkeit der Berührungsstelle des Körpers mit der Unterlage gleich Null wird. Bei der Einleitung einer horizontalen Bewegung eines vorher ruhenden, runden Körpers auf der Erde ist nun der Koeffizient der gleitenden Reibung im Allgemeinen ein so grosser, dass Gleiten überhaupt nur einen Moment stattfinden wird. Runde oder annähernd runde Körper, deren Stabilitätsmoment auf fester Unterlage vermöge dieser Gestalt ein sehr geringes ist, müssen in Folge dessen bei entsprechend einwirkender Kraft auf ebener Erde sehr leicht ins Rollen gerathen.

IV. Haupttypus.

Die haarförmigen Flugorgane.

(Taf. I, Fig. IV und Taf. II, Fig. 3. Vgl. hiezu Fig.-Erkl.)

Die Organe stellen ein, durch die körnchenförmige Nuss in der Mitte belastetes, einfaches Haar dar. Der Körperdurchmesser ist nach zwei Dimensionen so gering, dass, wie bei den staubförmigen Körpern, die an der Oberfläche verdichtete Lufthülle den in Bezug auf den Luftwiderstand wirksamen Querschnitt in einer Richtung erheblich vergrössert. Die Fallverzögerung ist dementsprechend sehr bedeutend und würde bei gleichbleibendem mittleren Vertikaldurchmesser der Körper in einem umgekehrten Verhältniss zu ihrem horizontalen Querdurchmesser stehen. Die Organe besitzen stabile Gleichgewichtslage in horizontaler Stellung; typisch drehen sie nicht. Die Bewegung des Schwerpunktes ist in ruhiger Luft eine geradlinige senkrechte.

Typische hierhergehörige Beispiele bilden die Samen verschiedener Bromeliaceen. Die der Gesneracee Aeschynanthus speciosus und andere schliessen sich nahe an.

Der Schwerpunkt liegt in der Mitte, bei Krümmungen auf der konkaven Seite. Drehungen kommen zwar vor, haben aber keine Bedeutung für das Flugvermögen. Sie dienen nur dazu, die Organe in ihre Gleichgewichtslage, welche bei typischer einfacher Haarform die horizontale ihrer Längsaxe ist, einzustellen. Dieser Typus geht bei Zunahme der Haare, anderer Anordnung sowie Änderung des Belastungsortes durch Zwischenformen in den III., VI. oder VII. Typus über.

Samen von Pitcairnia imbricata (Bromel.).

Die Samen stellen 14 mm lange, $^1/_{12}$ — $^1/_{13}$ mm breite,

flache, meist etwas gekrümmte Haare dar, deren Mitte etwas verdickt ist. Die Verdickung ist walzlich spindelförmig, 2—3 mm lang und $^1/_5$—$^1/_4$ mm dick, und wird durch die Nuss und den etwas verbreiterten beiderseitigen Haaransatz gebildet. Unter dem Mikroskop erweist sich das Haar als ein aus lufthaltigen Zellen gebildetes, mehrfach und häufig in etwas verschiedener Weise gedrehtes Band. Die Fallbeschleunigung ist in Folge des Luftwiderstandes gering. Bei etwas windigem Wetter war es mir, trotz zahlreicher Versuche, im Zimmer lange nicht möglich auch nur annähernd genaue Fallgeschwindigkeiten festzustellen. In Folge Einwirkung der allerschwächsten Luftströmungen wurden so bedeutende Änderungen in der Geschwindigkeit erzeugt, dass häufig die unteren Strecken des Fallraumes längere Zeit als die oberen in Anspruch nahmen.

Im Einzelnen verhalten sich die Samen sehr verschieden. Ich führe als konkretes Beispiel das Verhalten eines Samens an, welcher in der Fallgeschwindigkeit Mittelwerthe zeigte. Nachdem einzelne Samen nicht mehr wägbar sind und bei der unregelmässigen Gestalt des Haares eine Volumberechnung unthunlich ist, wurden 52 gut entwickelte Exemplare ausgewählt und aus deren mit äusserster Sorgfalt ermitteltem Gesammtgewicht das Durchschnittsgewicht berechnet. Dasselbe betrug 0,04025 mgm, wovon das Nüsschen 0,02692 mgm und die beiden Haaranhänge 0,01333 mgm ausmachen. Das Versuchsorgan, welches ein relativ grosses wohl entwickeltes Nüsschen besass, war etwas gebogen, d. h. die beiden an sich ziemlich geraden Haaranhänge waren unter einem Winkel von 9° von der Richtung des geraden $1^1/_2$ mm langen und im Mittel $^3/_{20}$ mm breiten Nüsschens abgebogen. Die Haaranhänge bestanden aus einem steil schraubig gedrehten Band mit quer ziemlich ebener Schraubenfläche, deren Längsprojektion eine zwischen $^1/_{40}$ und $^1/_{12}$ mm schwankende Breite zeigte. Die mittlere Breite betrug im Durchschnitt $^{13}/_{240}$. Nachdem die ganze horizontale Längsprojektion $12^1/_4$ mm mass, von denen 3 auf die Nuss und den verbreiterten Ansatz der beiden Haare kamen, so blieb für die beiden eigentlichen Haare $9^1/_4$ mm Länge übrig. Die ganze Projektionsfläche betrug somit

$$3 \cdot {}^{3}/_{20} + 9^{1}/_{4} \cdot \frac{13}{240} = 0{,}95104 \text{ qmm}$$

Die Messung wurde mittelst des Mikroskopes mit so grosser Sorgfalt gemacht, dass höchstens ganz geringe Fehler unterlaufen konnten.

Dieser Same durchfiel die ersten 6 m in 22 Sek., davon den

1. m in 4,1 Sek.
2. „ „ 3,92 „
3. „ „ 3,68 „
4.—6. „ „ 10,3 „ somit je 1 m in 3,43 Sek.

so dass man mit vollkommener Sicherheit annehmen kann, dass die Fallzeit pro Meter nicht unter 3,3 Sek. herabgeht. Dies macht auf eine Sekunde Fallzeit 30 cm Fallraum.

Führen wir nun die Grössen v = 300 mm und f = 0,95104 qmm in unsere Widerstandsgleichung ein, so bekommen wir

$$w = 0{,}001293 \cdot 0{,}95104 \cdot \frac{300^2}{19620}$$

$$w = 0{,}00564 \text{ mgm}$$

d. h. der Widerstand der Luft, welcher der Beschleunigung das Gleichgewicht hält, entspricht einem Gewichte von 0,00564 mgm, da das wirkliche Gewicht des Samens aber 0,04025 beträgt, so genügt bereits der siebente Theil des dem wirklichen Gewichte entsprechenden Luftwiderstandes, um der Fallbeschleunigung das Gleichgewicht zu halten.

Fügen wir das wirkliche Gewicht des Samens in die Formel ein und berechnen die entsprechende Projektionsfläche, so erhalten wir dem entsprechend f = 6,78 qmm; also einen den gemessenen ebenfalls um das siebenfache übertreffenden Querschnitt.

Die dem gemessenen Gewichte und Querschnitt entsprechende Geschwindigkeit ist, wenn wir 3 = 1 annehmen, was aber in jedem Falle etwas zu gross ist,

$$v = \sqrt{\frac{0{,}04025 \cdot 19620}{0{,}001293 \cdot 0{,}95104}}$$

$$v = 801 \text{ mm}$$

Die berechnete Geschwindigkeit wäre also die zwei und zweidrittelfache der beobachteten.

Selbst kleine Fehler in der Berechnung der wirksamen Projektionsfläche des Samens oder des Gewichtes angenommen – die Unterschiede welche die Beobachtung und die Berechnung ergeben, erweisen auch hier wiederum eine viel zu bedeutende Differenz, als dass sie auf andere Gründe, wie auf die verdichtete oberflächliche Lufthülle zurückgeführt werden könnte.

Würde der Coeffizient 3 nach seiner wirklichen Grösse, welche im vorliegenden Falle wegen der verschiedenen Neigung der ebenen Flächen des Haaranhanges und der Zylinderfläche der Nuss unter 1 sinkt, in die Formel eingeführt, so würde die berechnete Geschwindigkeit sogar einen noch etwas höheren Betrag erreichen.

Zur Controle dieses Resultates habe ich noch mehrere andere Berechnungen mit Pitcairnia-Samen gemacht, mit, der jeweiligen Drehungsweise des Haares entsprechender, sehr sorgfältiger Berechnung des Coeffizienten 3 für die Gestalt der Widerstandsfläche. Dieselben ergaben alle, wenn auch etwas abweichende, doch dem Obigen entsprechende sehr nahekommende Resultate. Der Raum gestattet mir nicht, diese Berechnungen im Einzelnen hier aufzuführen.

Eine des Vergleichs halber vorgenommene approximative Berechnung ergab unter Annahme einer überall gleichstarken, unbeweglichen zylindrischen Lufthülle eine Dicke derselben von 0,23 mm. Eine Reihe von Versuchen mit geeigneteren haarförmigen Objekten, welche in mancher Beziehung grössere Schwierigkeiten als solche mit staubförmigen bieten, konnte ich bis jetzt nicht beendigen und werde darüber gelegentlich berichten. In jedem Falle ist aber schon mit vorstehendem Resultate die Bedeutung der Lufthülle für die Flugfähigkeit mit Haaren versehener pflanzlicher Flugorgane, welche a priori zu vermuthen war, *) ganz ausser allen Zweifel gestellt und die ausserordentliche Leistungsfähigkeit der Haarapparate erwiesen.

*) A. Kerner „der Einfluss der Winde auf die Verbreitung der Samen im Hochgebirge“ in Zeitschr. d. deutschen Alpenvereins Jahrg. 1870–71 Bd. II pag. 144.

Leistungsgrösse des Typus.

Die Leistungsgrösse der Samen von Pitcairnia imbricata betrug, wie wir gesehen haben $\frac{801}{300} = 2{,}67$. Dieselbe ist also bedeutend und hängt, wie bei den staubförmigen Körpern, von der Dicke der Lufthülle ab. Diese nimmt, ähnlich wie bei jenen, mit der Abnahme des horizontalen Breitedurchmessers zu und steht also, wie die Leistungsgrösse, bei gleichem Vertikaldurchmesser der Körper in einem umgekehrten Verhältniss zu der Breitendimension der Horizontalprojektion. Über das Gesetz dieses Verhältnisses ist mir ebensowenig wie bei den staubförmigen Organen weiteres bekannt.

Die Leistungsfähigkeit der haarförmigen Organe kann nur einen Bruchtheil derjenigen der staubförmigen betragen, da der wirksame Querschnitt nur nach einer Dimension wesentlich vergrössert wird. Während der letztere bei kugelförmigen Staubkörpern, bei einer Hülle, welche beispielsweise dem Durchmesser gleichkommt, beiläufig das $7^1/_2$fache des Körperquerschnittes allein beträgt, ist der wirksame Querschnitt eines haarförmigen Körpers von demselben Durchmesser, aber 100 mal so grosser Länge, bei gleicher Dicke der Lufthülle, nur mehr etwas über 3mal so gross. Mit noch weiter wachsender Verlängerung des Haares nähert sich das Verhältniss immer mehr der Zahl 3. Bei wachsender Dicke der Hülle wächst dieser Unterschied noch bedeutend. Das Verhältniss der Vergrösserung des horizontalen Querschnittes durch die Lufthülle nähert sich bei wachsender Verlängerung eines Haares überhaupt immer mehr der Zahl, welche anzeigt, um wie viel mal der Durchmesser des luftumhüllten Körpers dicker ist, als derjenige des Haares allein. Übertrifft z. B. die Dicke der Lufthülle den Körperdurchmesser 10 mal, ist also der Durchmesser von Körper sammt Hülle 21 mal so gross als der des Körpers allein, so haben wir für letzteren, wenn er Kugelgestalt von dem Durchmesser $d = 1$ besitzt, nach der Formel $r^2\pi = d^2\frac{\pi}{4}$ einen Querschnitt gleich $1^2 \cdot \frac{3{,}1415}{4} = 0{,}8754$.

Für den Körper sammt Lufthülle dagegen $21^2 \cdot \frac{3,1415}{4} = 441$ Der letztere Querschnitt übertrifft also den ersteren um mehr als das 561fache. Ist der Körper dagegen ein Haar oder ein Zylinder mit halbkugeligen Enden von der Dicke $d = 1$ und der Länge $l = 100$, so haben wir für ihn allein einen horizontalen Querschnitt von der Grösse $(l-d)\ d + d^2 \frac{\pi}{4} =$ $(100 - 1)\ 1 + 1^2 \cdot \frac{3,1415}{4} = 99,7854$. Für den horizontalen Querschnitt des Körpers sammt Lufthülle dagegen haben wir, wenn wir den Gesammtdurchmesser $21 = d'$ nennen: $(l - d)\ d' + d'^2 \frac{\pi}{4} = (100 - 1)\ 21 + 21^2 \cdot \frac{3,1415}{4} = 2520$. Der wirksame Querschnitt wird bei gleicher Dicke der Lufthülle, beim Haar somit nur um das 25,2fache vergrössert und die Vergrösserungen der wirksamen Querschnitte von Staubkörper und Haarkörper verhalten sich in vorliegendem Falle zueinander wie $\frac{2520}{25,2} = \frac{100}{1}$. Mit der jeweiligen Vergrösserung der Projektionsfläche steht aber, wie schon mehrfach dargelegt wurde, bei sonst gleich bleibenden Bedingungen, die Leistungsgrösse in direktem geradem Verhältniss. Es geht daraus hervor, dass letztere bei den haarförmigen Flugorganen einen, wesentlich von der relativen Dicke der Lufthülle abhängigen, Bruchtheil der Leistungsgrösse der staubförmigen Organe darstellt.

Mechanik der Einstellung.

Die haarförmigen Samen von Pitcairnia imbricata stellen sich beim freien Fall aus beliebiger Lage rasch horizontal und erhalten sich so. Diese Lage ist also stabil. Die Samen thun dies, ob sie ganz gerade, oder ob sie etwas gebogen sind. Denselben Vorgang sehen wir bei jedem haarförmigen Körper, ob Pflanzen- ob Thierhaar, wenn das Haar überall gleichdick und homogen ist, oder wenn es beiderseits symmetrisch gestaltet ist und seinen Schwerpunkt in der Mitte hat.

Die Oberfläche eines typischen Haares bildet eine Zylinderfläche. Das Haar der Pitcairniasamen stellt zwar ein flaches und noch dazu gedrehtes Band dar, indessen schliesst sich das Verhalten einer jeden im Verhältniss zur Breite unverhältnissmässig verlängerten ebenen oder auch quer beliebig (symmetrisch) gekrümmten Fläche zum Luftwiderstand im Prinzip so nahe an das Verhalten einer sehr verlängerten Zylinderfläche an, dass ich, um allzugrosse Weitschweifigkeit zu vermeiden, nur die typische Cylinderfläche hier in Betracht ziehen will.

Ein Luftstrom, welcher eine Kugeloberfläche trifft, fliesst, wie wir gesehen haben, nach allen Richtungen gleich leicht ab. Eine Zylinderfläche, welche senkrecht zu ihrer Axe vom Luftstrom getroffen wird, bietet dagegen in den zwei zu einander senkrechten Hauptrichtungen ihrer Fläche dem Angriff ganz verschiedene Neigungen dar: Quer zur Axe eine nach zwei Seiten gleichmässig gekrümmte Fläche, welche, wie die Kugelfläche, beiderseits bedeutend erleichterten Luftabfluss gestattet; in der Längsrichtung dagegen eine ebene Fläche, welche in ihren mittleren Theilen den seitlichen Abfluss relativ erschwert und nur an ihren beiderseitigen Enden denselben erleichtert. In senkrechter Stellung der Längsaxe zu einem Luftstrom, z. B. in horizontaler Fallstellung, wird sich ein Zylinder in Gleichgewichtslage befinden, indem die algebraische Summe aller statischen Momente gleich Null ist. Dasselbe ist der Fall bei beliebiger Drehung eines geraden Zylinders um seine Längsaxe.

Drehen wir jedoch einen solchen stark verlängerten Zylinder aus horizontaler Stellung um seine im Raume horizontale Queraxe, und lassen dann den Luftstrom einwirken, in dem wir ersteren in geneigter Stellung fallen lassen, so geschieht Folgendes: In der Längsrichtung der Zylinderfläche trifft der Luftstrom nun nicht mehr eine zu ihm senkrechte ebene Fläche, welche nach beiden Seiten gleich leichten oder schweren Abfluss zulässt, sondern eine Fläche, welche in der Richtung ihrer Neigung einen, wenn auch nur sehr wenig, doch etwas erleichterten Abfluss gestattet. Dieser erleichterte Abfluss wird an der sehr verlängerten Zylinderfläche eines Haares nur an ihrem oberen Ende zur Wirkung

gelangen, wogegen die Drücke längs der ganzen übrigen Fläche für gleich breite Zonen gleich sein müssen. Der Druck auf die Flächeneinheit, welche hier eine unendlich schmale Zylinderzone darstellt, ist somit im obersten Theil eines in schiefer Stellung fallenden Haares geringer, als in den übrigen und der Erfolg dieses Vorganges ist gerade so, als ob die wirksame Fläche, welche sich auf dieser Seite des Schwerpunktes resp. der durch den Schwerpunkt gehenden Queraxe befindet, wenn wir alle Flächenelemente als gleich stark getroffen betrachten, um den Minderbetrag des Druckes verkürzt wäre. In diesem Falle muss aber dann der Druck auf das grössere untere Ende des Zylinders überwiegen und dieses um die horizontale Schwerpunkts-Axe nach aufwärts drehen. Da der Angriffspunkt des Luftwiderstandes sich immer in der geometrischen Mitte gleichstark angegriffener Flächenstücke befindet, rückt er über den Schwerpunkt hinaus auf die abwärts geneigte Haarhälfte. Damit wirkt er aber, ausserdem dass er, entsprechend seinen beiden senkrecht nach aufwärts und horizontal seitlich gerichteten Komponenten, das Haar erstens im Fall verzögert und zweitens ihm eine seitliche Bewegungsrichtung zu ertheilen strebt, als drehende Kraft. Und zwar hängt das Moment dieser Kraft von der Grösse des Überdruckes und von der Entfernung des Angriffspunktes vom Schwerpunkte, resp. von dem Kosinus des Neigungswinkels zur horizontalen oder dem Sinus des Neigungswinkels zur Angriffsrichtung ab. Je länger ein Haar bei gleicher Dicke ist, um so geringer wird der Effekt der Drehung sein, indem mit der Verlängerung die Widerstände bedeutend wachsen, und zwar sowohl das Trägheitsmoment in Bezug auf die quere Drehaxe als der Luftwiderstand gegen die Drehung. Während ganz kurze Haarstücke viertels bis halbe Umdrehungen machen können, stellen sich längere Haare langsam horizontal, indem sie keine merklichen Oszillationen über die horizontale Gleichgewichtslage hinaus ausführen.

Mit sehr leichten, hohlen, walzenförmigen Papiermodellen, deren Länge den Durchmesser vielfach übertrifft, kann man die hier geschilderten Vorgänge noch besser, wie an den wegen ihrer Feinheit schwieriger zu beobachtenden

natürlichen Objekten verfolgen, nur hat hier die grössere Endfläche bereits einen gewissen, wenn auch den Gesammteffekt nicht wesentlich ändernden Einfluss. Ganz ähnlich verhalten sich etwas gekrümmte Haare, ganz besonders solche mit stärker belasteter Mitte wie die Samen der geschilderten Pitcairnia imbricata. Dass dieselben eine Fallstellung mit nach unten konvexer Krümmung einnehmen, beruht auf der in dieser Lage tiefsten Stellung des Schwerpunktes.

Die grosse Stabilität der horizontalen Gleichgewichtslage beim Fall, von welcher wir das direkte Gegentheil bei den flach scheibenförmigen Körpern der V. Gruppe sehen werden, beruht also zunächst auf dem in querer Richtung der Zylinderfläche so sehr erleichterten Luftabflusse. Bei horizontaler Lage findet kein irgendwie bedeutender Überdruck in der Mitte der Fläche statt, sondern fast die ganze Unterfläche, ausgenommen die äussersten Enden, stehen unter gleichem Gegendruck der Luft. Andererseits ruft jede Neigung sofort ihr entgegengerichteten, jedoch nur geringen Widerstand hervor. Dieser reicht dazu hin, den Zylinder wieder horizontal zu stellen, jedoch nicht, um ihm bedeutendere lebendige Kraft der Drehung um die horizontale Queraxe zu ertheilen, welche nöthig wäre, wenn der Körper etwas weiter über die Gleichgewichtslage hinaus sich bewegen sollte. In Folge der grossen Länge der Haare im Verhältniss zu ihrer Dicke besitzen sie einerseits sehr geringe Masse und haben andererseits, da der gegen die Drehung stattfindende Luftwiderstand mit dem Quadrat der Entfernung der getroffenen Flächentheile von der Drehaxe wächst, einen sehr bedeutenden Widerstand zu überwinden. Dieser Widerstand wird erhöht durch den dicken Mantel von verdichteter Luft, welcher sie einhüllt. Wir haben also bei geringer Körpermasse und geringem Moment der drehenden Kräfte überaus grosse zu überwindende Widerstände. Haare mit medianem Schwerpunkt ruhen in Folge dessen beim Fall so sicher in ihrer horizontalen Gleichgewichtslage, wie auf fester Unterlage.

Es wiederholen sich solche Drehungsvorgänge in mehr oder weniger ähnlicher Weise immer wieder im Laufe vorliegender Betrachtungen. Ich will daher, um mehrfache

Wiederholung zu vermeiden, so weit hier möglich, etwas näher auf die mechanischen Bedingungen derselben eingehen.

Die Linie a d (Fig. 3, Taf. IV) stelle die Vertikalprojektion eines in geneigter Stellung fallenden Haares dar. Bei s liege sein Schwerpunkt. Die statischen Momente m o der drehenden Kräfte des Luftwiderstandes auf die beiden gleichlangen Strecken S b und S c des Haares sind einander gleich, also

$$mo_2 - mo_3 = o$$

Die statischen Momente der Drehkräfte, welche auf die beiden Randstrecken a b und c d wirken, sind aber nicht gleich, sondern jenes der Strecke c d ist wegen des erleichterten Luftabflusses kleiner. Also

$$mo_1 - mo_4 > o$$

Addiren wir diese Ungleichung zur obigen Gleichung, so erhalten wir

$$(mo_1 + mo_2) - (mo_3 + mo_4) > o$$

Nachdem aber $m_1 + m_2$ und $m_3 + m_4$ die statischen Gesammtmomente darstellen, welche je an einer Längshälfte angreifen, so haben wir, wenn Mo_1 und Mo_2 dieselben bezeichnen

$$Mo_1 - Mo_2 > o$$

d. h. die algebraische Summe sämmtlicher statischen Momente ist grösser als Null und das überwiegende Moment, welches dasjenige der abwärts gerichteten Hälfte ist, wirkt aufwärts drehend. Der Angriffspunkt A wird dabei von s aus soweit gegen a verschoben, dass für die gegebene Neigung die Summe der statischen Momente beiderseits desselben gleich Null ist. Die Strecke s A ist nach einigen, nach dem Prinzip der früheren (vgl. pag. 35—39) angestellten Versuchen in Wirklichkeit sehr klein und auch bei stärkster Neigung noch bedeutend kürzer als sie schematisch in der Figur gezeichnet ist.

Mit der fortschreitenden Drehung rückt A immer näher an s, bis es in horizontaler Lage des Organs mit ihm zusammenfällt. Hiemit ist dann die Gleichgewichtslage erreicht.

Die Drehung freier unveränderlicher materieller Systeme, welche erzeugt wird, wenn die Resultirende einer wirksamen Kraft nicht durch den Schwerpunkt geht, können wir, wie früher ausgeführt, als um den Schwerpunkt statt-

findend ansehen, wenn wir die gesammte übrige Bewegung des Schwerpunktes gesondert betrachten. Absolut genommen findet sie aber in jedem Augenblicke nicht um den Schwerpunkt, respektive um eine Schwerpunktsaxe statt, sondern um eine, ihre Lage jeden Augenblick wechselnde Momentanaxe, deren Ort von der Richtung der Kraft und von der Entfernung des Angriffpunktes vom Schwerpunkt des Systems bedingt wird. Die erzeugte Winkelgeschwindigkeit der Drehung ist, abgesehen von Reibungswiderständen gleich der Grösse des Momentes der angreifenden Kraft, getheilt durch das Trägheitsmoment des Systems in Bezug auf die durch den Schwerpunkt gehende Drehaxe.

Denken wir uns das in geneigter Stellung freifallende haarförmige Flugorgan als eine homogene, materielle Linie mit medianem Schwerpunkt (s) dargestellt durch die schiefe Linie a b (Fig. 4, Taf. IV). Die Richtung und Grösse des das eine Ende nach aufwärts drehenden Luftwiderstandes sei gegeben durch die Linie C D = P.

Beim freien Fall wirkt ausser dem Luftwiderstand zwar noch die Schwerkraft ein, da diese jedoch im Schwerpunkt s angreift, können wir dieselbe behufs Betrachtung der Bewegung, welche der Körper vollführt, zunächst vernachlässigen.

Mit beginnender Drehung des Körpers ändert sich nun aber in jedem Momente die Richtung der drehenden Kraft P respektive die Richtung des Körpers zu dieser, und in Folge dessen gleichzeitig, wie wir früher gesehen haben der Angriffspunkt derselben, indem er näher gegen den Schwerpunkt verschoben wird. Der wirksame Hebelarm des Momentes, welcher durch die Normale dargestellt wird, die man von dem Schwerpunkte auf die Richtung der Kraft zieht, verkürzt sich dadurch beständig. Andererseits steigt die Grösse der Kraft mit der Fallbeschleunigung im Quadrat der Geschwindigkeit. Wir haben also veränderliche Grösse, Richtung und Angriffspunkte der Kraft. Dazu kommt mit Beginn der Drehung noch eine neue Kraft hinzu, die Zentrifugalkraft, welche dem Körper das Bestreben ertheilt sich um seinen Trägheitsmittelpunkt, also um seinen Schwerpunkt zu drehen. Griffe die drehende Kraft im luftleeren Raume nur einen Augenblick als Momentankraft an, so würde sich

der Schwerpunkt in einer Kurve um das Momentanzentrum bewegen, indem er sich ihm in der Richtung derselben fortwährend nähern würde, nachdem jedoch die Kraft mit beständig wechselnder Richtung und Angriffspunkt dauernd angreift, und ausserdem der Widerstand des umgebenden Mediums ein höchst bedeutender ist, so ist die Bahn des Schwerpunktes eine sehr verschiedene. Sie entfernt sich von dem Momentanzentrum immer mehr, respektive letzteres rückt immer weiter hinaus bis in unendliche Entfernung, d. h. aus der Drehung wird allmählich eine geradlinige Bewegung. Denken wir uns die kontinuirlich fortwirkende Kraft des Luftwiderstandes in lauter einzelne, stossweise wirkende Momentankräfte zerlegt, von denen jede die im gegebenen Moment der kontinuirlichen Kraft zukommende Grösse, Richtung und Angriffspunkt besitzt, so lässt sich daraus in Verbindung mit den erzeugten Zentrifugalkräften einer beschleunigten Drehung die Bewegung im Einzelnen verfolgen.

Das Momentanzentrum einer Drehung in Folge Einwirkung einer Momentankraft, respektive die Lage der Momentanaxe, welche durch dieses Zentrum geht, lässt sich finden, wenn man den Trägheitsradius des Körpers kennt, welcher sich aus dem Trägheitsmoment des Körpers in Bezug auf seinen Trägheitsmittelpunkt berechnen lässt.*) Fällen

*) Da der Trägheitsradius der mittlere Radius ist, mit dessen Quadrat die Gesammtmasse multipliziert werden muss um die Grösse des Trägheitsmomentes in Bezug auf den Schwerpunkt zu finden, so ist das Quadrat desselben gegeben durch den Quotienten der Körpermasse in das Trägheitsmoment. Das Trägheitsmoment T einer homogenen materiellen Linie von der Länge 2 L in Bezug auf die rechtwinklig zu seiner Länge verlaufende Schwerpunktsaxe ist aber nach bekannten Formeln gleich

$$T = M\varrho^2 = {}^2/_3\,\gamma\,L^3$$

worin γ die Masse der Längeneinheit der Linie bedeutet, also ergibt sich, da die Masse M des ganzen Systems gleich $\gamma \cdot 2\,L$ ist, der Trägheitsradius ϱ aus der Gleichung

$$\varrho^2 = \frac{{}^2/_3\,\gamma\,L^3}{2\,\gamma\,L}$$

$$\varrho^2 = {}^1/_3\,L^2$$

$$\varrho = L\sqrt{\frac{1}{3}}$$

wir (Fig. 4, Taf. IV) von s auf die verlängerte Linie CD eine Normale, errichten auf dieser in dem Punkte s eine senkrechte sH von der Länge des Trägheitsradius ϱ und verbinden den Punkt D mit H, so bekommen wir, wenn wir auf der Linie DH in dem Punkte H ebenfalls eine Normale errichten, in dem Schnittpunkt E dieser mit der Linie ED das gesuchte Momentanzentrum. Dieser Punkt E rückt, je mehr sich der Körper senkrecht zur Richtung des Luftwiderstandes stellt, also je mehr E sich s nähert, um so weiter nach links hinaus, indem, wie sich aus der geometrischen Konstruktion ergibt, ϱ^2 immer gleich $sE \cdot sD$ sein muss.

Die durch die Momentankraft erzeugte Winkelgeschwindigkeit ω*) ist gegeben durch den Quotienten des Trägheitsmomentes in die Grösse des Drehmomentes. Letzteres (Mo) ist bekanntlich Kraft mal Hebelarm. Da $CA = P$ die Grösse der Kraft, und $sD = sA \sin \beta$ die Grösse des wirksamen Hebelarmes darstellt, ist, wenn wir für sD den Buchstaben e setzen

$$Mo = Pe \sin \beta;$$

das Trägheitsmoment T der Linie ab ist $\frac{2}{3} \gamma L^3$, also ist die Winkelgeschwindigkeit

$$\omega = \frac{3Pe \sin \beta}{2\gamma L^3}$$

oder, da $2L \cdot \gamma$ gleich der Masse M ist

$$\omega = \frac{3Pe \sin \beta}{ML^2}.$$

Die lebendige Kraft und somit auch die Zentrifugalkraft, welche bei einer derartigen Drehung eines fallenden Haares im widerstehenden Medium erzeugt wird, ist nun aber in Wirklichkeit in Folge der enormen Widerstände minimal, sie ist fast gleich Null zu setzen, in Folge dessen

*) Die Winkelgeschwindigkeit eines sich drehenden Körpers ist bekanntlich das Verhältniss zwischen der linearen Geschwindigkeit (oder Bogengeschwindigkeit) seiner einzelnen Punkte und deren Abstand vom gemeinsamen Drehpunkte, welches für alle Punkte eines sich drehenden unveränderlichen Systems dasselbe bleibt. Also $\omega = \frac{v}{r} = \frac{\text{Bogengeschwindigkeit}}{\text{Radius.}}$

beeinflusst sie die Lage der Momentanzentra auch nur in kaum bemerklichem Grade. Die Drehung geht sehr langsam und mit minimaler Beschleunigung vor sich.

Ausser der Drehwirkung selbst, welche der Luftwiderstand mit der algebraischen Summe der statischen Momente ausübt, kommt, wenn wir nunmehr noch die fortschreitende Bewegung des Schwerpunktes besonders betrachten, nach dem mechanischen Gesetze, dass alle auf einen Körper wirkenden Kräfte gleichzeitig im Schwerpunkt angreifen, noch die vom ersten Moment des Falles an durch den Luftwiderstand erzeugte, momentan-geradlinige Bewegung in Betracht. Die Gesammtheit aller auf die Unterfläche des Haares ausgeübten Drücke erzeugt eine als Druck wirkende Resultante, von welcher, wie früher (vgl. Fig. 1, Taf. IV) ausgeführt, entsprechend der Schieftstellung des Körpers die jeweilig zur getroffenen Fläche normal gerichtete Komponente zur Wirkung kommt. Dieselbe sucht, gemäss ihrer Grösse, den Körper in ihrer Richtung geradlinig weiter zu bewegen.

Es bleibt nun noch die Wirkung der Schwere zu betrachten, welche wir bisher vernachlässigt haben. Dieselbe greift im Schwerpunkte an und wirkt als senkrecht nach abwärts gerichteter Zug. Somit unterliegt das Haar, ausser der Drehwirkung, zwei in seinem Schwerpunkte angreifenden Geschwindigkeiten, welche durch eine resultirende Geschwindigkeit ersetzt werden können. Die resultirende Bahn des Schwerpunktes und damit des ganzen Körpers wird aber, da die Neigung der Angriffsfläche wechselt, in jedem Momente ihre Richtung ändern. Es wird aus ursprünglich steil geneigter Fallstellung eine anfangs sich immer mehr krümmende, dann wieder flacher werdende Kurve erzeugt, welche bei zunehmender Horizontalstellung des Haares durch einen Wendepunkt in eine Kurve entgegengesetzter Krümmung übergeht. Diese Kurve nimmt weiterhin immer mehr geradlinige Abwärtsrichtung an und geht in senkrechte Fallbewegung über.

Fig. 5 Taf. IV gibt eine schematische Verdeutlichung dieses Vorganges. Die Linie a b sei das in steil geneigter Stellung fallende Haar. Die Linie s g entspreche dem Weg, welchen der Schwerpunkt s beim Fall im luftleeren Raume in

der Zeiteinheit zurücklegen würde. c s bedeute die Grösse des in entgegengesetzter Richtung nach aufwärts wirkenden Luftwiderstandes, von welchem wegen der geneigten Lage der Angriffsfläche aber nur die Komponente d s zur Ausnützung gelangt und den Punkt s bis nach f zu bewegen strebt. Die resultirende Bahn ist dann gegeben durch die Diagonale s s' des Parallelogramms s f g s'. Je nach der wechselnden Stellung des Haares und der Grösse der angreifenden Kräfte wiederholt sich dies nun für jeden unendlich kleinen Zeitraum und wir erhalten somit aus den sämmtlichen Diagonalen die doppeltgekrümmte ebene Curve, deren Verlauf durch die Punkte s, s', s'' . . schematisch angedeutet ist. Die seitliche Verschiebung eines solchen Haares ist sehr unbedeutend, indem wegen der geringen Breite der Angriffsfläche das Moment der Kraft nur klein ist.

Was das Verhalten haarförmiger Körper mit einseitig verschobenem Schwerpunkt angeht, so sind mir zwar keine Samen bekannt geworden, welche typisch nach diesem Prinzip gebaut wären, jedoch muss ich der Vollständigkeit der Erscheinungen halber das Verhalten solcher Körper erwähnen.

Relativ sehr unbedeutende Belastung des Endes eines geraden Haares, welche bewirkt, dass der Schwerpunkt nur wenig von der Längsmitte nach der belasteten Seite verschoben ist, genügt nämlich bereits, um die stabile Fallstellung zu einer senkrechten werden zu lassen, wogegen Körper mit breiterer Fläche, wie wir später sehen werden, trotz sehr bedeutender Verschiebung des Schwerpunktes, eine mehr oder weniger stark geneigte Lage als stabile Gleichgewichtsstellung annehmen. Der Grund liegt wesentlich in dem so sehr erleichterten seitlichen Luftabfluss bei den überaus schmalen haarförmigen Körpern. Der Minderdruck auf das oberste Flächenstück der aufwärts gerichteten Haarhälfte ist so gering, dass der Angriffspunkt der Mittelkraft aller Drücke selbst bei sehr steiler Neigung des Haares noch über den Schwerpunkt hinausfällt und der Luftwiderstand somit auf den oberen Theil als aufwärts drehende Kraft wirkt. Nur bei ganz minimaler Verschiebung treten schiefe Gleichgewichtslagen ein.

Bei den Samen von Pitcairnia imbricata ist zwar eben-

falls häufig der Schwerpunkt nicht genau in der Mitte der Länge, gleichwohl tritt hier doch immer Horizontalstellung ein. Es geschieht das deswegen, weil dieselben nie ganz gerade sind und weil das Gewicht der Nuss bedeutend überwiegt. Der Schwerpunkt fällt noch in dieselbe, und sie sucht, entsprechend ihrer Masse, mit solch überwiegender Kraft vorauszueilen, dass der Unterschied in der Widerstandsgrösse der beiden ungleich langen Haarhälften kaum mehr zur Wahrnehmung kommt.

Die Fallgeschwindigkeit einseitig belasteter Haare mit senkrechter Fallstellung ist ebenfalls bedeutend verlangsamt, doch bei weitem nicht in dem Masse, wie bei Haaren von horizontaler Fallstellung. Die Verzögerung wird hier, ausser durch die verdichtete Lufthülle, durch die parallele Reibung längs des im Verhältniss zu seinem Querdurchmesser so bedeutend verlängerten Haarkörpers erzeugt.

V. Haupttypus.

Die scheibenförmigen Flugorgane.

(Taf. I, Fig. V, 1 und 2: Taf. III, Fig. 1; vgl. Fig.-Erkl.)

Die Organe stellen ganz flache, im Umriss kreisrunde Körper dar. Sie bestehen entweder aus einer flügellosen, abgeflachten Nuss oder diese ist ausserdem noch mit einem besonderen häutigen Flügelrand umzogen. Der Schwerpunkt ist median. Stabile Gleichgewichtslage fehlt. Die Fallbewegung verläuft unter wenig beschleunigten nicht stabilen Drehungen um im Raume horizontale Flächenaxen und weicht stark von der lothrechten ab. Die Bahn des Schwerpunktes in ruhiger Luft stellt in Vertikalprojektion typisch eine Wellenlinie dar, deren Gesammtverlauf eine nach oben konkave Kurve von Anfangs zunehmender dann wieder abnehmender Krümmung bildet und sich schliesslich einer geraden Linie nähert. Diese Bahnlinie ist aus lauter kleinen, nach oben konkaven Sekundärkurven zusammengesetzt. In Horizontalprojektion stellt sie typisch eine gerade Linie dar, welche in Folge geringer Unsymmetrien leicht mehr oder weniger starke spiralige Krümmung annimmt. Wächst das Verhältniss von Oberfläche zur Masse über eine gewisse Grösse hinaus bei gleichem Flächeninhalt, so treten um so leichter Störungen in der beschleunigten Drehbewegung ein und die Fallgeschwindigkeit, welche bei regelmässiger Drehung nicht unbedeutend unter die theoretische sinkt, steigt, indem sie sich der theoretischen nähert.

Beispiele bilden die abgeflachten flügellosen Samen mancher Irideen und Liliaceen. Viele Samen mit beiderseitigem oder ringsum gehendem häutigen Flügelrand: z. B. von Danais fragans (Rubiac.), Distictis lactiflora (Bignoniac.), Aspidosperma (Asclepiad.).

Früchte mit beiderseitigem oder ringsum gehendem häutigen Flügelrand von Alnus, Betula, Peltaria (Crucif.), Pocockia (Papilion.), Ulmus.

Die zur Fläche vertikale Schwerpunktsaxe ist theoretisch die einzige stabile Axe der Körper. Die in der Fläche verlaufenden Axen sind einander alle gleich und in Folge dessen nicht stabil. Nachdem in der Regel Angriffsflächen für etwaige Drehungen um die Vertikalaxe fehlen, so kommen solche nur ganz ausnahmsweise vor.

Samen von Aspidosperma (Asclepiad.).

Die fast vollkommen kreisrunden Samen einer nicht näher bestimmten Art aus Brasilien, welche der kgl. Staatssammlung in München angehören, sind beispielsweise hieher zu rechnen. Die Nuss ist papierdünn, im Umriss rund, hat 13 mm Durchmesser und ist von einem enorm breiten, ganz dünnhäutigen, übrigens auf einer Seite ein wenig breiteren Flügel umzogen. Die ganzen Organe haben 60—65 mm im Durchmesser und sind nach einer Seite ein klein wenig, nur einige Millimeter verlängert. Die Nuss liegt etwas exzentrisch und der Schwerpunkt ist dadurch ein wenig verschoben. (Taf. III, Fig. 1.)

Aus horizontaler Lage fallen gelassen, schwanken sie anfangs, abwechselnd gegensinnig drehend, mit zunehmender Grösse des Ausschlagwinkels um eine im Raume horizontale Flächenaxe, bis schliesslich gleichsinnige halbe Umdrehungen um die gleiche Axe eintreten. Die Bahn des Schwerpunktes ist dabei in der Vertikalprojektion anfangs eine aus lauter nach oben konkaven Kurven zusammengesetzte Zickzacklinie, bei ganzen, resp. bei wiederholten halben Umdrehungen eine steil geneigte, nach aufwärts etwas konkave wellenförmige Linie von anfangs zunehmender, dann abnehmender Neigung zur horizontalen, welche aus lauter sekundären Kurven besteht. Diese entsprechen je einer halben Umdrehung. Die Drehungen haben aber nicht die geringste Stabilität und ganz unmerkliche Luftbewegungen verursachen Störungen. Die Möglichkeit solcher Störungen wird noch

gesteigert durch etwas unregelmässige Umrissform der Organe und die etwas exzentrische Lage des Schwerpunktes bei ausserordentlich geringer Masse im Verhältniss zur Flächenentwicklung. Es kommt in Folge dessen nur sehr selten eine etwas längere Bahnstrecke unter gleichsinniger Drehbewegung zu Stande, und die Samen schwanken meist unregelmässig hin und her, indem sie zeitweilig eine oder mehrere Drehungen vollführen.

Aus senkrechter Fallstellung wurden von einem Versuchsorgan, welches 3020 qmm Flächeninhalt besass und 112 mgm wog, 6 m Fallraum in 9 Sekunden durchfallen und zwar je 3 m in 4,5 Sek., so dass also eine messbare Beschleunigung in der zweiten Hälfte der Fallzeit nicht eintrat. Es entspricht diese Geschwindigkeit 0,666 m pro Sekunde. Die seitliche Abweichung von der lothrechten war in Folge der Unregelmässigkeit der Bahn eine sehr verschiedene und betrug bis zu $^3/_5$ der Fallhöhe. Aus horizontaler Fallstellung nahm die Fallzeit während der ersten 3 m um 0,2 Sek. zu.

Durch die in der Bewegungsrichtung stattfindenden Drehungen werden hier im Verhältniss zu Formen von stabiler Fallstellung vollkommen veränderte Bedingungen des Luftwiderstandes erzeugt, indessen bietet doch die Anwendung der Widerstandsformel einen Anhaltspunkt, die Grössen der Masse und Fläche mit der Fallgeschwindigkeit resp. der Fallverzögerung, also der Leistung in Beziehung zu bringen und dadurch mit denen anders gestalteter und funktionirender Organe zu vergleichen.

Fügen wir die ermittelten Grössen ein, so bekommen wir, wenn wir 3 entsprechend der ebenen Widerstandsfläche zu $\frac{4}{3} = 1{,}33$ bestimmen,

$$v = \sqrt{\frac{19620 \cdot 112}{0{,}001293 \cdot 3020 \cdot 1{,}33}}$$

$$v = 653 \text{ mm}$$

somit ein ganz überraschendes Resultat. Die Fallgeschwindigkeit stimmt trotz der Drehungen nahezu mit der berechneten Fallgeschwindigkeit bei regelmässiger Fallbewegung in dauernd horizontaler Lage.

Die Leistungsgrösse beträgt $\frac{0{,}653}{0{,}666} = 0{,}98$, also nahezu 1.

Eine Versuchsreihe mit aus Papier hergestellten kreisförmigen flachen Scheiben von 800 qmm Flächeninhalt, deren Radius somit $r = \sqrt{\frac{800}{\pi}} = 15{,}9$ mm betrug, ergab die in beifolgender Tabelle verzeichneten Resultate. Modell Nr. 1 wog 81 mgm und war aus glattem festem Schreibpapier hergestellt, Modell Nr. 2 wog 24 mgm und bestand aus feinstem Briefpapier.

Modell-nummer		Fallzeit auf 6 m in Sek.	Fallzeit auf die ersten 3 m in Sek.	Fallzeit auf die letzten 3 m in Sek.	Fallgeschw. pro Sek. in m	Berechnete Geschw. für 3 = 4/3 in m	Leistungsgrösse
1	längste	6,6	3,4	3,2	0,937	1,073	1,145
	kürzeste	6,2	3,0	3,2	0,939	1,073	1,145
2	längste	13,2	6,6	6,6	0,454	0,584	1,286
	kürzeste	11,4	5,8	5,6	0,535	0,584	1,091

Modell Nr. 1 bewegte sich regelmässig in horizontal projizirt etwas spiralig gekrümmter Bahn. Die Unterschiede in der Fallgeschwindigkeit kommen auf den Anfang der Bahn und zwar fiel die grössere Fallgeschwindigkeit auf senkrechte Fallstellung, wogegen horizontale Fallstellung etwas verzögerte Anfangsgeschwindigkeit verursachte. Modell Nr. 2 bewegte sich, wie die Tabelle zeigt, mit sehr verschiedener Geschwindigkeit und zwar steigerte sich die Fallgeschwindigkeit mit der Unregelmässigkeit der Bewegung. Bei geringster Fallgeschwindigkeit wurde eine ziemlich weite Spirale beschrieben und die Drehungen verliefen regelmässig gleichsinnig. Meist war dies jedoch nicht der Fall und es entstanden dann etwas spiralige, doch ziemlich unregelmässige Bahnen, wobei häufig anstatt halber Umdrehungen nur Viertels- bis Dreiachtelsumdrehungen gemacht wurden.

Leistungsgrösse des Typus.

Fügen wir die für den berechneten Aspidospermasamen

festgestellten Grössen in unsere Gleichung, indem wir diesmal $3 = 1$ setzen, so erhalten wir 0,751 m als grösste theoretische gegenüber 0,666 m grösster beobachteter Fallgeschwindigkeit. Die Leistungsgrösse ist demnach $\frac{0,751}{0,666} = 1,129$. Fügen wir für die beiden geprüften Papiermodelle in die Widerstandsformel $3 = 1$ ein, so erhalten wir für Nr. 1 eine theoretische Fallgeschwindigkeit von 1,322 m, somit ist die Leistungsgrösse $\frac{1,239}{0,987} = 1,239$. Für das Modell Nr. 2 ergibt sich eine theoretische Fallgeschwindigkeit von 0,674 m, und die Leistungsgrösse schwankt somit nach den beobachteten Grenzgeschwindigkeiten zwischen $\frac{0,674}{0,454} = 1,484$ und $\frac{0,674}{0,535} = 1,26$.

Es ist dies um so auffallender, als in Folge der Drehung diese Organe dem Luftwiderstande im Mittel fast nur die Hälfte ihrer grössten Projektionsfläche entgegensetzen. Die Gründe für die Fallverzögerung liegen in der lebendigen Kraft der drehenden Masse, welche den Luftwiderstand trotz der im Durchschnitt verminderten Projektionsfläche besser auszunützen gestattet. Das Prinzip der Ausnützung ist das gleiche wie bei den Haupttypen VIII und IX, bei letzterem wird in Folge beschleunigterer Drehung nur noch grösserer Nutzeffekt erzielt. Die Leistungsgrösse steigert sich aber namentlich, wenn die Organe durch einseitige Verlängerung in die Form der „länglichen Platte", also in den IX. Haupttypus übergehen.

Zur Mechanik des Vorganges.

Was die Mechanik der Vorgänge anlangt, so beruht dieselbe darauf, dass bei keiner Lage des Organs Stabilität vorhanden ist. Die senkrechte Flächenstellung besitzt nur labiles Gleichgewicht. In horizontaler Stellung findet der stärkste Angriff durch den Luftwiderstand wegen erschwerten Abflusses und stärkerer Krompression der Luft in der Mitte der Unterfläche statt, nach den Seiten zu ist der

Druck geringer. Das Blatt schwankt so gewissermassen wie auf einer spitzen Unterlage. Bei der mindesten Neigung aber verschiebt sich sofort der Angriffspunkt der Resultirenden etwas gegen die abwärts geneigte Seite zu und der Luftwiderstand wirkt in Folge dessen aufwärts drehend um die durch den Schwerpunkt gehende, im Raum horizontale Flächenaxe. Das Blatt dreht sich sofort zurück in seine Gleichgewichtslage, überschreitet aber vermöge der erzeugten lebendigen Kraft dieselbe, so dass sich der nämliche Vorgang nun auf der anderen Seite wiederholt. Diese Schwankungen steigern sich bei der fortwährend beschleunigten Fallgeschwindigkeit und der dadurch gesteigerten Grösse des Luftwiderstandes immer mehr, bis schliesslich die lebendige Kraft der in Drehung begriffenen Masse den beträchtlichen Widerstand, welcher einer vollständigen halben Umdrehung sich entgegensetzt, zu überwinden im Stande ist. Damit ist aber wieder der Punkt erreicht, wo der Luftwiderstand die einmal eingeleitete Drehung weiter beschleunigt. Also ist auch die horizontale Fallstellung in der Luft labil.

Während das Blatt sich in geneigter Stellung befindet, kommt gleichzeitig, wie bei der Einstellungsdrehung der haarförmigen Organe, eine horizontal gerichtete Komponente zur Wirkung, welche, nach dem mechanischen Lehrsatze, dass alle auf ein materielles System wirkenden Kräfte gleichzeitig im Schwerpunkt angreifen, seitlichen Druck auf den Schwerpunkt und damit Verschiebung des ganzen Organs erzeugt. Die Grösse dieser Verschiebung hängt von dem Neigungswinkel, unter welchem das Blatt getroffen wird, also seiner Projektionsgrösse, von der Fallgeschwindigkeit und von der Masse und Flächengrösse des Blattes ab. Die zwei ersteren Grössen sind variabel, in Folge dessen kommt eine sehr komplizirte nach oben konkave Bahnkurve des Blattes oder vielmehr seines Schwerpunktes zu Stande. Diese Bahn geht aus anfangs stark geneigter Richtung mit steigender Krümmung in schliesslich fast horizontale über und entspricht den jeweiligen Resultirenden in dem Zeitabschnitt und den verschiedenen Stellungen des Blattes zwischen zwei aufeinander folgenden Stellungen entgegengesetzter stärkster Neigung.

Was den Vorgang der vollständigen Drehung, resp. der wiederholten halben Umdrehungen um die horizontale Axe anlangt, worin die endgültige Bewegungsart besteht, so erhält sich diese bei absolut ruhiger Luft dauernd. Doch will ich hier, um Wiederholungen zu vermeiden, auf die spätere Schilderung einer prinzipiell gleichen Bewegung verweisen, nämlich bei der Gruppe IX der „länglichen Platten", wo sie eine sehr wichtige Rolle spielt und als höchst stabile, beschleunigte Drehungserscheinung in sehr charakteristischer Weise auftritt. Die Drehungsvorgänge der flach scheibenförmigen Flugorgane stehen in der Mitte zwischen der kaum beschleunigten Einstellungsdrehung bei den Organen des vorigen Typus und den beschleunigteren Drehungen bei den Organen des VIII. und IX. Typus.

VI. Haupttypus.

Die konvex scheibenförmigen Flugorgane.

(Taf. I, Fig. VI, 1—3; Taf. II, Fig. 4; Taf. III, Fig. 2; vgl. Fig.-Erkl.)

Die Organe sind im Umriss runde, abgeflacht konkav-konvexe oder bikonvexe Körper, welche aus einer medianen, meist bikonvexen Nuss und einem entweder ganz flachen oder eine Kegel- oder Kugelzone darstellenden, ringsum gehenden Flügel bestehen. Der Flügel ist in der Regel häutig, selten ein dichter Haarkranz. Sie besitzen stabile Gleichgewichtslage in horizontaler Flächenstellung mit abwärts gerichteter Konvexität. Die Fallbewegung in ruhiger Luft ist eine geradlinige senkrechte. Drehungen um die Vertikalaxe kommen häufig vor, haben aber keine Bedeutung für die Funktion. Die Fallgeschwindigkeit entspricht der theoretischen bei Einrechnung des Koeffizienten der Widerstandsfläche. Es gilt dies auch für die mit einem Haarkranz versehenen Organe, wenn dessen Fläche als geschlossen betrachtet wird.

Beispiele: Bikonvexe Samen mit flachem häutigem Flügel von Eccremocarpus scaber (Bignoniac.); ebensolche Früchte von Paliurus aculeatus (Rhamnac.), Terminalia diptera (Combretac.). Konkav-konvexe, häutig geflügelte Samen von Eccremocarpus scaber, Dianthus glacialis; ebensolche Früchte von Ptelea trifoliata (Zanthoxyl.). Mit einem dichten Kranz strahlig abstehender, gerader Haare umgebene Samen von Cochlospermum orenocense (Bixac.).

Die beiderseitigen Begrenzungsflächen der Organe stellen entweder einfache Kugelschalen dar, oder Kugelschalen in Verbindung mit Kugelzonen von grösserem Radius, oder solche in Verbindung mit flachen Kegelzonen oder mit ringförmigen ebenen Flächen. Bei bikonvexen (linsenförmigen) Organen, deren Begrenzungsflächen gleichen Radius besitzen, liegt, Homoge-

nität vorausgesetzt, der Schwerpunkt in der Mitte der Körper. Bei ganz dünnen Kugelschalen von gleicher Stärke läge er in der Mitte ihrer vertikalen Axe, allein nachdem die Nuss immer dicker ist, als der Flügel, und den mittleren, die Axe umgebenden Theil des Organes einnimmt, so ist bei den konkav-konvexen Formen in Folge dessen der Schwerpunkt immer näher an die konvexe Seite der Organe verlegt.

Die Körper besitzen eine stabile Hauptträgheitsaxe, nämlich die zur Fläche vertikale. Die dazu senkrecht gerichteten Flächenaxen sind einander gleich und nicht stabil. Drehungen um die erstere kommen häufig vor, sind aber wenig beschleunigt. Es werden nämlich bei zentrischem Schwerpunkt in Folge geringer Unregelmässigkeiten der Randflächenelemente leicht horizontale Kraftkomponenten erzeugt, welche sich gegenseitig nicht mehr kompensiren, indem die Summe der statischen Momente in Bezug auf die Vertikalaxe dann grösser als Null wird. Die Drehungen sind aber nur wenig beschleunigt und haben in Folge dessen auch keinen Einfluss auf die ohnehin schon vorhandene Stabilität der Lage.

Bei nicht ganz zentrischem Schwerpunkt kommen ausserdem geringe Abweichungen von der lothrechten Fallbahn vor, welche, wenn auch nur ganz geringe Unsymmetrie der Flächen sich zugesellt, zu steil spiralig gestalteten Bahnen werden. Die dabei entstehenden, langsam verlaufenden Drehungen um die Vertikalaxe sind mit der Spirale gleichsinnig. Drehungen um im Raume horizontale Flächenaxen dienen nur zur Einstellung in die stabile Gleichgewichtslage.

Hier anzureihen wären manche zweiflügelige, meist im Umriss mehr oder weniger längliche Flugorgane, wie z. B. gewisse Bignoniaceensamen, welche in Ruhe fast ganz flach, in Folge des Luftwiderstandes beim Fall eine nach unten konvexe Krümmung annehmen und sich nun genau ebenso verhalten, wie die typisch gestalteten, starren Organe dieses Typus. Bei flacher werdenden, im übrigen typisch gebauten Formen kommen leicht Drehungen um Flächenaxen zu Stande und der Typus geht dann in den vorhergehenden V. und den IX. über. Letzteres namentlich mit zunehmender Verlängerung der Organe.

Früchte von Ptelea trifoliata (Zanthoxyl.).

Diese nicht sehr typisch ausgebildeten Früchte wurden in Ermangelung geeigneterer Formen von ähnlicher Grösse zu Versuchen benützt. Es wurden hiezu stärker konvex gekrümmte Exemplare ausgewählt.

Die Organe bestehen aus einer linsenförmig zusammengedrückten, im Umriss elliptischen, bikonvexen Nuss, welche von einem breiten, steifen, häutigen Flügelrand umzogen ist. Die ganze Frucht ist im Umriss fast kreisrund, und durchschnittlich 25—26 mm im Durchmesser haltend, von welchen c. 7 mm auf die Nuss und der Rest auf den Flügel kommt. Der Flügel ist öfter ziemlich flach oder unregelmässig verbogen, oder endlich in der Mehrzahl der Fälle in einer Richtung schwach gekrümmt oder eine niedrige Kugelzone von grossem Radius darstellend. In letzterem Falle ist der Rand häufig wieder etwas zurückgekrümmt, so dass flach schüsselförmige Gestalten (wie z. B. Fig. 2, Taf. III) entstehen.

Diese Früchte verhalten sich nun, je nach der Krümmung ihres Flügels verschieden. Ist derselbe ganz flach, so entspricht ihr Verhalten ganz demjenigen der flachen Scheibe. Sie fallen, wenigstens anfangs, unregelmässig, indem sie um eine im Raume horizontale Flächenaxe auf- und abschwanken oder auch eine oder die andere halbe Umdrehung machen. Schliesslich drehen sie sich aber in ziemlich stabiler Weise um die Flächenaxe, welche mit der Längsaxe der länglichen Nuss zusammenfällt, entsprechend dem, in Folge der Massenvertheilung etwas abweichenden Trägheitsmomente dieser Axe und ihrer gegen den Luftwiderstand stabilsten Stellung. Letzteres trifft in dem öfteren Falle zu, dass der Umriss des ganzen Organs gleichzeitig etwas länglich ist. Sie bewegen sich in diesem Fall in einer windschiefen, gekrümmten Bahn und bilden mit dieser Art der Bewegung einen Uebergang zum V. und namentlich zum IX. Typus, dessen Bewegung später eingehend betrachtet werden soll.

Ist der Flügel jedoch hinreichend gekrümmt, was meist der Fall ist, so drehen sie, wenigstens wenn sie aus horizontaler oder nur mässig geneigter Stellung fallen, nur ihre konkave Fläche nach oben und fallen dann in mehr oder weniger lothrechter Bahn zu Boden.

Die Grenze für dies Verhalten ist bei der Mehrzahl der Früchte, welche nur geringe Krümmung besitzen, eine Neigung der Fallstellung von 54—60° zum Horizont. Noch steiler geneigt, drehen sie ebenfalls. Bei stärkerer Krümmung drehen sie nicht mehr. Es geht uns hier natürlich nur die erstere Bewegungsform an, nur wegen des Vergleiches der beiden Funktionsarten bei den nämlichen Organen berühre ich in Kürze auch die Drehbewegung.

Ein Versuchsexemplar von mässiger Krümmung durchfiel in horizontaler Stellung, mit der Konvexität nach unten gerichtet, den

1. m in 1 Sek.
2. „ „ 0,6 „
3. „ „ 0,5 „

drehend um seine im Raum horizontale Flächenaxe, durchmass es dagegen den

1. m in 0,9 Sek.
2. „ „ 1,— „
3. „ „ 0,7 „

Die auffallenden Zahlen bei der letztern Funktion erklären sich namentlich aus den eigenthümlich verwickelten Verhältnissen der Bahn, welche hier beschrieben wird. Auf die Gründe dieser eigenthümlichen Bewegung wird bei dem IX. Typus näher eingegangen werden, hier sei nur hervorgehoben, dass sie in Anbetracht ihres Zweckes mehr leistet als die erstere.

Ein anderes ganz schwach konvex gekrümmtes Versuchsorgan ergab, genau gemessen und berechnet, folgende Grössen: der Umriss desselben war fast genau kreisförmig und sein Flächeninhalt betrug 499 qmm, von denen auf die elliptische Nuss 170, auf den Flügel 329 kamen. Die ganze Frucht wog 0,064 grm, hievon die Nuss allein 0,044 und der Flügel 0,022.

Das Organ durchfiel in horizontaler Flächenstellung mit der konkaven Seite aufwärts gerichtet und in fast lothrechter Linie 6 m Fallhöhe in 4,4 Sekunden, davon den

1. m in 0,9 Sek.
2. „ „ 0,78 „
3. „ „ 0,72 „
4.—6. „ „ 2,0 „ also je 1 m in 0,66 Sek.

Die Grenze der Beschleunigung ist mit dieser letzteren Geschwindigkeit, welche 1,5 m pro Sekunde beträgt, so gut wie erreicht, sie muss ihr wenigstens sehr nahe kommen. Führen wir daher die erhaltenen Grössen in die Widerstandsformel ein, wobei wir schätzungsweise den Koeffizienten 3 der geringen Krümmung halber = 1 setzen, so erhalten wir folgende theoretische Geschwindigkeit:

$$v = \sqrt{\frac{19620 \cdot 64}{0{,}001293 \cdot 499}}$$

$$v = 1398 \text{ mm}$$

also in runder Summe 1,4 m. Gegenüber der beobachteten grössten Geschwindigkeit von 1,5 ein sehr gut übereinstimmendes Resultat, welches nur um $\frac{1}{15}$ zu gering ist. Die Differenz würde sich übrigens noch um einen kleinen Bruchtheil vergrössern, wenn die wirklich grösste Fallgeschwindigkeit eingeführt worden wäre.

Samen von Eccremocarpus scaber (Bignoniac.).

Die kleine bikonvexe Nuss von c. 3 mm Breite und $^1/_2$ mm Dickendurchmesser ist von einem c. $^3/_4$ mm breiten häutigen Flügelsaume umgeben, welcher entweder ganz flach ist oder häufiger mehr oder weniger konkav gewölbt, eine sehr flache Kegel- oder eine Kugelzone darstellt. Einige möglichst gleichmässig entwickelte Exemplare ergaben als durchschnittliches Gewicht 0,00066 grm. Die Samen fallen, ob der Flügel flach oder konkav gestaltet ist, in horizontaler Stellung, lothrecht oder meist in sehr steiler Schraubenlinie zu Boden. Die Fallgeschwindigkeit betrug bei einem Samen von obigen Dimensionen mit konkav aufgebogenem Flügel für den

1. m 1,4 Sek.
2. „ 1,2 „
3. „ 1,1 „
4.—6. „ 3,1 „ also für je 1 m 1,03 Sek.:

Die grösste Fallgeschwindigkeit erreichte der Same also mit 1 m auf die Sekunde. Dieselbe kommt der gleichförmigen Fallgeschwindigkeit jedenfalls sehr nahe. Einige Berechnungen, welche ich anstellte, gaben in Folge der grossen

Ungleichheit der Samen, welche zu klein sind um andere als Durchschnittswägungen zuzulassen, bis zu einem gewissen Grade entsprechende, doch zu schwankende und dadurch zu unsichere Resultate, um sie hier anzuführen.

Während verschiedene Samen ähnliche Fallzeiten ergaben, wie der oben genauer angeführte, ergab ein anderer, mit kaum messbar breiterem aber ganz flachem Flügel auf die Fallhöhe von 6 m einen ansehnlichen Unterschied. Anstatt 6,8 Sek. brauchte er genau 8 Sekunden und fiel ebenfalls in ganz horizontaler Flächenstellung.

Samen von Cochlospermum orenocense (Bixac.).

Die länglich wurmförmige, schneckenartig in einer Ebene eingerollte Nuss ist auf der äusseren (von dem Mittelpunkte der Schnecke abgekehrten) Seite mit einem dichten Kranze langer feiner Haare besetzt, welche in ihrer Gesammtheit einen breiten, flachen Flügelrand von kreisrunder Gestalt, analog demjenigen von Pteleafrüchten darstellen. Die sehr auffallenden Samen haben grosse Ähnlichkeit mit eingerollten, auf dem Rücken lange Haare tragenden Schmetterlingsraupen. Der Durchmesser der ganzen Samen beträgt beiläufig 22 mm, derjenige der Nuss zwischen 4 und $5^1/_2$ mm. Da die Schneckenwindung im Zentrum nicht ganz vollkommen geschlossen ist, so bleibt hier eine kleine Öffnung von $^3/_4 - 1$ qmm. Der Same ist, abgesehen von der zylindrisch gestalteten, dickeren und beiderseits vorspringenden Nuss, in ruhendem Zustande fast ganz flach, beim Fall krümmen sich die Haare ein klein wenig konkav nach oben, so dass dadurch eine nach abwärts ganz schwach konvexe Fläche hergestellt wird.

Ein Versuchsorgan, welches 22 mm Durchmesser besass und eine fast genau kreisförmige Fläche von 415 qmm Inhalt darstellte, mass bei schwacher Aufwärtskrümmung seines Haarkranzes (welche nach Schätzung derjenigen während des Falles entsprach) 20 mm Durchmesser und somit $r^2\pi = 10^2 \cdot 3{,}1415 = 314$ qmm Flächeninhalt. Da die Organe beim Fall stabile Horizontalstellung besitzen, so stellt diese Grösse die wirksame Projektionsfläche gegen den Luftwiderstand dar. Das Gewicht betrug 35,8 mgm. Der Same durchfiel den

1. m in 0,8 Sek.
2. „ „ 0,8 „
3. „ „ 0,8 „
4.—6. „ „ 2,4 „ also je 1 m in 0,73 Sek.

Letztere Geschwindigkeit kommt der gleichförmigen jedenfalls sehr nahe und beträgt pro Sekunde 1,37 m. Auffallend sind die ganz gleichen Fallzeiten in den 3 ersten Metern. Nach einer vorläufigen Erklärung, welche aber, wie ich ausdrücklich bemerken will, durch Versuche bis jetzt nicht gestützt ist, liegt dies an dem zunehmenden Schluss der Haare bei wachsendem Luftwiderstande. Dieser kompensirt bis zu einem gewissen Grade immer wieder die beginnende grössere Fallgeschwindigkeit.

Was nun das Mass der Leistungsfähigkeit des Apparates zur Ausnützung des Luftwiderstandes anlangt, so erhalten wir, wenn wir obige Grössen in unsere Gleichung einfügen und schätzungsweise $\zeta = 1$ setzen,

$$v = \sqrt{\frac{19620 \cdot 35{,}8}{0{,}001293 \cdot 314}}$$

$$v = 1{,}31 \text{ m}$$

d. h. die berechnete Fallgeschwindigkeit ist nur um 0,06 geringer als die beobachtete. Der Unterschied würde etwas grösser werden, wenn uns die wirklich grösste Geschwindigkeit des Samens bekannt wäre, welche um einen geringen Betrag über die beobachtete hinausgehen muss. Es ist dabei zu beachten, dass eine relativ nicht unbedeutende Öffnung in der Mitte der Widerstandsfläche dem innersten Theil der auftreffenden Luftstrahlen abzufliessen gestattet. Die seitliche Reibung, welche beim Durchströmen entsteht, gleicht indessen den direkten Widerstandsverlust ziemlich aus. Übrigens ist bei so geringen Krümmungen, welche sich nicht genau feststellen lassen, die Grösse des Koeffizienten ζ durchaus nicht sicher zu bestimmen.

Leistungsgrösse des Typus.

Die Leistungsgrösse zweier Formen dieses Typus ist mit den beiden Berechnungen für Ptelea trifoliata und Coch-

lospermun orenocense bereits gegeben, indem dort schon für die Grösse des Koeffizienten 3 schätzungsweise 1 gesetzt wurde. Aus den beobachteten und berechneten Grössen erhalten wir für die ersteren $\frac{1398}{1500} = 0{,}93$ und für die letzteren $\frac{1310}{1370} = 0{,}96$. In beiden Fällen ist die Leistungsgrösse demnach nahezu 1 und es entspricht diese Zahl wohl so ziemlich der höchsten Leistungsgrösse des Typus, indem Organe mit noch geringerer Konvexität ihrer Widerstandsfläche in Folge Verlustes der Stabilität ihrer Lage überhaupt nicht mehr so funktioniren. Steigt die Konvexität der Widerstandsfläche, so vermindert sich in Folge leichteren seitlichen Luftabflusses auch die Leistungsgrösse. Mit der Annäherung an halbkugelige Gestalt, welche rein übrigens kaum vorkommen dürfte, würde dieselbe gegen 0,7 herabsinken, entsprechend den Verhältnissen, wie wir sie bei dem II. und III. Haupttypus sahen.

Zur Mechanik der Einstellung.

Als Widerstandsfläche zur möglichsten Ausnützung des Luftwiderstandes ist eine konvexe Fläche, speziell eine Kugelfläche oder ein Stück einer solchen im Grunde ungünstig, wie wir gesehen haben. Flächen von geringer Krümmung, wie z. B. kleine Stücke von Kugelflächen, gestatten indessen eine ziemlich bedeutende Ausnützung, und bedingen gleichzeitig, wenn die Krümmung nicht unter ein gewisses Mass herabsinkt, stabile Fallstellung mit senkrecht abwärts gerichteter Konvexität.

Lassen wir eine homogene Halbkugel mit nach abwärts gerichteter Konvexität frei durch die Luft fallen, so behält sie diese Lage bei und kippt nicht um, obschon ihr Schwerpunkt in einer Entfernung von nur $^3/_8$ des Radius von dem Mittelpunkt der Kugelfläche entfernt liegt. Bei jeder Drehung um eine horizontale Axe geht nämlich die verlängerte Resultirende des Luftwiderstandes auf der geneigten Seite an dem Schwerpunkt vorbei und dreht in Folge dessen eben diese Seite wieder nach aufwärts. Zum Verständniss dieses Vorganges muss man sich daran erinnern, dass immer nur

die zu einer geneigten Fläche normal gerichtete Komponente zur Wirksamkeit gelangt und dass die Verlängerung einer jeden zur Kugelfläche Normalen einem Kugelradius entspricht, somit durch den Mittelpunkt der Kugelfläche geht. Das statische Moment der drehenden Kräfte wächst, wenn wir nicht eine massive Halbkugel, sondern eine dünnwandige Halbkugelschale benützen. Der Schwerpunkt liegt hier in der Entfernung $\frac{1}{2}$ r vom Mittelpunkt der Kugelfläche und damit muss der wirksame Hebelarm des Momentes nicht unbedeutend sich verlängern. Umgekehrt stürzen dünnwandige Halbkugelschalen, welche man mit ihrer Konkavität voraus fallen lässt, sofort um, wie schon S. 25 erwähnt wurde.

Die natürlichen Körper dieser Kategorie besitzen nun in Wirklichkeit mehr oder weniger die Gestalt flacher Kugelschalen, wenigstens fällt ihr Verhalten zum Luftwiderstand sehr nahe mit solchen zusammen. Höchstens ist der Schwerpunkt näher gegen die Schalenfläche verschoben, da die Mitte derselben von der schweren Nuss eingenommen wird. Hiedurch wächst aber nur das Stabilitätsmoment gegenüber Schalen von gleicher Dicke.

Fällt eine dünnwandige, flache Kugelschale in horizontaler Stellung des sie begrenzenden Kreisumfanges, mit ihrer Konvexität oder mit ihrer Konkavität nach abwärts gerichtet, senkrecht abwärts durch die Luft, so ist die algebraische Summe aller statischen Momente gleich Null. Die Schale befindet sich also im Gleichgewicht. Neigen wir nun die Schale und lassen sie dann fallen, so sehen wir folgendes: Die Figuren 6 und 7 Taf. IV sollen das Verhalten solcher, in geneigter Stellung fallen gelassener, dünnwandiger flacher Kugelschalen zum Luftwiderstand darstellen. Die Linie ADB stellt jedesmal einen, in der Richtung der stärksten Neigung durch die Kugelschale gelegten, senkrechten Medianschnitt dar. In Fig. 6 ist die Konvexität, in Fig. 7 die Konkavität nach abwärts gerichtet. Betrachten wir zunächst ersteren Vorgang. Die punktirte Linie BG ist die horizontale Projektion von ADB und GH = BH, nachdem CD auf AB und FH auf BG senkrecht steht. In der Richtung der Pfeile greifen die einzelnen Drücke des

Luftwiderstandes an der Widerstandsfläche A D B an. Die Grösse der Drücke p, p' . . . auf jedes Element der Projektionsfläche sei gleich. Nach dem früher erörterten Satze wirken aber immer nur die zur Widerstandsfläche normalen Komponenten der einzelnen Drücke, in Folge dessen wirken alle auf eine Kugelfläche treffenden Drücke überhaupt nur in der Richtung der Radien, welche auf ihren Angriffspunkt treffen. Somit müssen die einzelnen Druckkomponenten an Grösse sehr ungleich sein, indem die Flächenelemente sehr ungleiche Neigung zur Richtung der Kraft haben und zwar nimmt bei einer, unserer Figur entsprechenden Neigung der Schale ihre Grösse von dem Punkte B an nach links fortwährend ab.

Nachdem nun C der Mittelpunkt der Kugelschale, S der Schwerpunkt derselben ist, so müssen die wirksamen Komponenten aller Drücke, welche das Flächenstück B D treffen, rechts an S vorbeigehen, wogegen diejenigen der Drücke, welche zwischen D und A auftreffen, links von S vorbeigehen. Die ersteren suchen somit die rechte, die letzteren die linke Seite der Kugelschale nach aufwärts zu drehen. Fällen wir von D eine Normale auf B G, so steht nunmehr die Summe der statischen Momente aller Drücke zwischen B und J derjenigen zwischen J und G gegenüber. Wenn die Einzelmomente einander gleich wären, so würde schon die auf die längere Strecke B J entfallende grössere Summe überwiegen, aber ausserdem ist auch jedes einzelne Moment der Strecke B J grösser als jedes einzelne Moment der Strecke J G. Der auf die rechte Seite wirkende, aufwärts gerichtete Gesammtdruck überwiegt also und dreht diese Seite um die durch S gehende, im Raum horizontale (zur Papierfläche senkrechte) Axe aufwärts. Die Resultirende aller Drücke hat etwa die Richtung des Pfeiles R. Ausser der Aufwärtsdrehung, also dem Bestreben, die Schale in horizontaler Lage einzustellen, macht sich dann noch eine horizontal gerichtete Komponente geltend, welche eine, in der Richtung der aufwärts sich drehenden Seite stattfindende seitliche Verschiebung erzeugt. Die horizontalen Komponenten der einzelnen Drücke kompensiren sich nämlich nicht, wie in horizontaler Lage der Schale, sondern wirken alle in

gleicher Richtung. Der Schwerpunkt wird somit bis zur Horizontalstellung eine S förmig gekrümmte Kurve beschreiben.

Umgekehrt verhält sich die Sache bei Fig. 7. Hier überwiegen bei weitem die gleichsinnig drehenden Drücke auf das Stück G J der Horizontalprojektion, wie ich nicht weiter ausführen will, da die Figur den Vorgang vollständig erläutert, entsprechend der Konstruktion von Fig. 6. Die Resultirende aller Drücke entspricht etwa der Richtung des Pfeiles R und dreht hier die linke Seite der Schale nach aufwärts. Gleichzeitig findet eine seitliche Verschiebung statt und zwar hier in der Richtung nach rechts, also nach der abwärts drehenden Seite zu.

Aus diesen beiden Konstruktionen, welche sich mit kleinen Änderungen für alle Lagen anwenden lassen, ergibt sich, dass nur die horizontale Lage mit nach abwärts gerichteter Konvexität stabil sein kann. Die geringste Drehung, welche Schieflage bewirkt, erzeugt gleichzeitig drehende Kräfte, welche bei abwärts gerichteter Konvexität der ersten Drehung gegensinnig wirken und sie aufzuheben streben. Bei nach abwärts gerichteter Konkavität erzeugt dagegen die geringste Drehung, welche Schieflage bewirkt, sofort der ersten Drehung gleichsinnige Drehkräfte, welche dieselbe steigern und die Schale umstürzen. Die Konvexität muss sich also in jedem Falle nach abwärts drehen.

Dass bei diesen Einstellungsdrehungen die Winkelausschläge sich nicht bis zu allmählichem Umkippen steigern, wie wir dies bei den flach scheibenförmigen sahen, liegt an der, in Folge der starken Neigung der peripherischer gelegenen Flächenelemente verminderten Grösse der statischen Momente sowie an dem hier so bedeutend erleichterten Abfluss der Luft. Der einseitige Überdruck kann bei hinreichender Flächenkrümmung nie so gross werden, dass die dem Umkippen entgegenstehenden Widerstände überwunden werden. Der Ausschlagswinkel der Schwankungen um die Gleichgewichtslage nach etwaigen Störungen wächst nicht, sondern nimmt ab. Vergrössert man bei gleichbleibendem Umfange einer flachen Kugelschale deren Radius, so kommt man schliesslich an die Grenze, bei der hin-

reichend starke Neigung zur Horizontalen Drehung bis zum Umkippen bedingt. Die einmal begonnene Drehung setzt sich dann gleichsinnig fort. Geringere Neigungen zur Horizontalen gehen aber immer noch nach einigen abnehmenden Schwankungen in horizontale Gleichgewichtsstellung über. Macht man die Kugelschale schliesslich noch flacher, so kommt man an die Grenze, wo der Ausschlagswinkel der Einstellungsdrehungen wächst. Sobald dies eintritt, ist keine stabile Gleichgewichtslage mehr möglich.

Ein dichter, flacher Haarring, wie ihn die Samen von Cochlopermum besitzen, wird beim Fall durch den Luftwiderstand ebenfalls konkav nach aufwärts gewölbt. Im Übrigen ist seine Wirkung genau dieselbe wie die einer ähnlich gestalteten, ganz geschlossenen Fläche.

In Fällen, wo gar keine geschlossene Widerstandsfläche vorhanden ist, verhält sich der Vorgang im Einzelnen natürlich etwas verschieden, aber im Grunde bildet doch jedes Haar ein schmales Stück der betreffenden Fläche. Ist die Konkavität der einzelnen Flächen hier beim Fall anfangs nach abwärts gerichtet, so tritt ebenfalls Drehung um eine im Raum horizontale Schwerpunktsaxe des Organs ein und die konvexe Fläche wird wie früher nach abwärts gedreht.

Formen dieser Art gehören jedoch im Grunde nicht mehr hierher, sondern stellen Zwischentypen dar. Die Leistungsgrösse solcher Organe ist auch eine höhere, indem hier die Lufthülle eines jeden einzelnen Haares für sich vollständig zur Geltung gelangt. Sie bilden Übergänge zu den haarförmigen.

VII. Haupttypus.

Die fallschirmförmigen Flugorgane.

(Taf. I, Fig. VII, 1 u. 2. vgl. Fig.-Erkl.) *)

Die Organe bestehen aus einer meist etwas verlängert walzenförmigen Nuss, welche mit einem fallschirmartigen Apparat versehen ist. Letzterer hat meist die Gestalt eines umgestülpten Schirmes oder umgekehrten Kegelmantels und stellt entweder eine geschlossene oder durchbrochene Fläche dar. Im ersteren Falle ist er dünnhäutig, im zweiten besteht er aus dicht gestellten, einfachen oder gefiederten Haaren. Der Schwerpunkt liegt ausserhalb der Schirmfläche, in Folge dessen ist die Gleichgewichtslage, welche beim Fall eingenommen wird, sehr stabil. In derselben steht die einzige Symmetrieaxe der Körper lothrecht. Die Fallbewegung in ruhiger Luft ist eine geradlinige senkrechte. Die Fallgeschwindigkeit entspricht, wenn man auch die Haarschirme als geschlossene Flächen berechnet, bei Berücksichtigung der Gestalt der Widerstandsfläche im Allgemeinen der theoretischen.

Beispiele von Organen mit häutigen Schirmen von geschlossener Fläche bilden die Achenen vieler Dipsaceen, sowie Plumbagineen. Unter den Formen mit aus Haaren gebildeten Schirmen, welche wie eine geschlossene Fläche wirken, wären namentlich zahlreiche Arten aus der ungeheueren Familie der Compositen zu erwähnen. Die grösste Zahl der Compositenfrüchte besitzt indess Fallschirme, welche aus lockerer stehenden Haarstrahlen gebildet sind und welche nicht mehr als geschlossene Flächen

*) Nachdem die schematische Figur (VII, Taf. I) den Habitus vieler zugehöriger Organe von typischer Ausbildung bereits genügend wiedergibt, wurde bei diesem Typus von der Darstellung natürlicher Objekte Abstand genommen.

betrachtet werden können. Diese stellen nach unserer Eintheilung Übergangsformen (Zwischentypen) zu dem Typus der haarförmigen Organe dar. Ebenso verhält es sich mit den Achenen der Valerianeen und den Haarkrönchen tragenden Samen vieler Asclepiadeen und Apocyneen. Die Salicineensamen neigen theilweise mehr zum IV. Typus.

Dem Haupttypus sehr nahestehend, und wenn man will, hierherzurechnen, sind manche Fruchtformen, deren Schirme aus mehreren, ziemlich breiten häutigen Zipfeln oder Lappen bestehen, wie die Früchte von Triplaris und Ruprechtia (Polygon.), Getonia (Combretac.), Melanorrhoea (Anacard.) u. a. Ebenso gehört hierher ein auffallender Apparat, gebildet durch das an der Basis des oberständigen Fruchtknotens abgelöste und in Zipfel zerschlitzte Perigon, welches mittelst seines engen Schlundringes an der kopfigen Narbe des langen, bleibenden Griffels hängen bleibt: Leucadendron argenteum (Proteac.).

Eine zahllose Menge von Formen nähert sich mehr oder minder diesem Typus, so beispielsweise die mit einem abstehend behaarten Schwanz versehenen Früchtchen mancher Rosaceen (Dryas, Geum), Ranunculaceen (Pulsatilla, Clematis), ebenso die im Prinzip ähnlich gebildeten Samen mancher Apocyneen (z. B. Strophanthus), von Myricaria u. a. Die in vertrocknete, längere, nach oben erweiterte Blüthenhüllen eingeschlossenen kleinen Früchte mancher Papilionaceen, z. B. von Trifolium- und Astragalus-Arten (Gruppe Tragacantha) gehören ebenfalls hierher. Endlich sind die ganzen Fruchtstände von Tilia mit ihrem persistirenden, mit dem Stiele verwachsenen, steifhäutigen Deckblatt, welches gewissermassen einen Ausschnitt aus einem typisch gestalteten Fallschirm darstellt, hierher zu rechnen.

Der fallschirmartige Apparat hat bei den typischen Formen kegelmantelähnliche Gestalt, welche, von einer umgekehrten, geraden Kegelfläche ausgehend, einerseits zu paraboloidischen, ellipsoidischen, bis kugelschaligen Rotationsflächen mit konvexer Widerstandsfläche, andererseits zu solchen mit konkaver Widerstandsfläche übergeht. Der Schwerpunkt

fällt bei den typisch gestalteten Organen ganz ausserhalb des von der Widerstandsfläche des Schirmes eingeschlossenen Raumes, also unterhalb ihres beim Fall am tiefsten befindlichen Punktes. Die Stabilität ist in Folge dessen eine sehr grosse, namentlich in den zahlreichen Fällen (viele Compositen), wo der Fallschirm auf einem besonderen verlängerten Stiele an der Nuss befestigt ist. Aus jeder beliebigen, ursprünglichen Fallstellung drehen die Organe sofort die Nuss nach unten und den Fallschirm nach oben.

Drehungen um die stabile Hauptträgheitsaxe, welche von der einzigen Symmetrieaxe, der medianen Vertikalaxe gebildet wird, kommen zwar vor, sind aber nicht typisch und ganz ohne Bedeutung. Die sonst vorkommenden Drehungen sind Einstellungsdrehungen.

Dieser Typus, speziell die Formen mit konvexen Schirmflächen gehen direkt in den vorigen über. Die Formen mit Haarschirmen bilden zahllose Übergänge zum III., IV. und VI. Haupttypus.

Achenen von Asterocephalus spec. (Dipsac.)

In Ermanglung anderer geeigneter natürlicher Versuchsobjekte mit häutigem Fallschirm wurden die im Besitze der Münchener Staatssammlung befindlichen, nicht näher bestimmten Früchte unbekannter Herkunft benützt. Fig. VII Taf. I gibt, abgesehen von unwesentlichen Einzelheiten, den Habitus derselben richtig wieder.

Die Frucht stellt eine, von einem häutigen, nervendurchzogenem Schirm gekrönte, längliche, unten zugespitzte, walzliche Nuss dar. Die Nuss ist in den unteren $\frac{2}{3}$ ihrer Länge mit steil aufwärts gerichteten steifen Haaren besetzt. Diese Haare haben aber keine Funktion bei der Ausnützung des Luftwiderstandes, wie ich nachher zeigen werde, wirken in dieser Beziehung sogar ungünstig, sondern spielen offenbar nur beim Eindringen in den Boden eine Rolle als Widerhaken.

Die Nuss eines zu Fallversuchen benützten Organes war 8mm lang, in der Mitte 3mm dick, nach unten ziemlich lang zugespitzt, nach oben, dicht unter dem Schirm, scharf 8rippig. Zwischen den Rippen befindet sich je eine tiefe,

bis nahe zur medianen Längsaxe des Organs reichende, nach oben rundbogig gewölbte Nische. Der Schirm selbst stellt einen Trichter dar, dessen Vertikalprojektion annähernd kreisbogenförmige Begrenzungslinien zeigt. Die Höhe desselben betrug im vorliegenden Falle genau 5mm. Die Querprojektion des Schirmes, also die Öffnung des Trichters, ist bei den einzelnen Organen etwas verschieden gestaltet, bald mehr kreisförmig, bald etwas lappig. In unserem Falle war sie sehr genau elliptisch, so dass ihr Flächeninhalt, welcher die horizontale Projektion des ganzen Organs darstellt, als Ellipseninhalt berechnet werden konnte. Nachdem die grosse Axe (2a) $13^1/_2$ mm, die kleine Axe (2b) 10 mm betrug, so war der Inhalt nach der Formel $E = a \cdot b \cdot \pi$ gleich

$$E = \frac{27}{4} \cdot 5 \cdot 3{,}1415 = 106 \text{ qmm.}$$

Das Gewicht des Organs betrug 0,0205 grm, wovon 0,015 auf die Nuss und 0,0055 auf den Schirm kommen.

Die beobachtete Fallzeit für 6 m Höhe betrug 2,2 Sekunden. Hievon kamen auf den

1. m . . . 0,7 Sek.
2. „ . . . 0,4 „
3. „ . . . 0,3 „
4.—6. „ . . . 0,8 „ oder je 0,26 Sek. pro Meter.

Die grösste Fallgeschwindigkeit war mit dieser Geschwindigkeit, welche 3,8 m pro Sekunde beträgt, noch nicht ganz erreicht, indessen kam sie ihr doch nahe genug, wie sich aus der Abnahme der Differenz ergibt, um eine vergleichsweise Berechnung vorzunehmen. Sehr wesentlich ist hier der Koeffizient 3, welcher nach dem Profil der Früchte schätzungsweise unter die Grösse 0,5 herabgehen musste. Nachdem hier jedoch keine einfache Gestalt der Widerstandsfläche vorlag, so blieb nichts anderes übrig, als 3 selbst aus der bekannten Gleichung zu berechnen. Formen wir dieselbe entsprechend um, so erhalten wir

$$3 = \frac{2\,g\,w}{\gamma\,f\,v^2}$$

und führen wir die gefundenen Grössen in dieselbe ein, so erhalten wir

$$3 = \frac{19620 \cdot 20}{0{,}001293 \cdot 106 \cdot 3800^2}$$

$$3 = 0{,}44$$

d. h. der Apparat leistet nur den 0,44sten Theil dessen, was er vermöge seiner horizontalen Querschnittsgrösse bei gleichem Gewichte leisten sollte. Es ist dies die Folge der im Ganzen mehr oder weniger spitz kegelförmigen Gestalt seiner Widerstandsfläche, welche nicht gestattet, dass die horizontale Projektionsgrösse voll ausgenützt wird. Die Geschwindigkeit, aus Gewicht und Projektionsfläche berechnet, würde für $3 = 1$ anstatt 3,8 m nur 1,69 m pro Sekunde betragen.

Die Leistungsfähigkeit der Organe ist danach also eine sehr geringe. In Wirklichkeit ist sie noch etwas geringer als hier berechnet, da die grösste Fallgeschwindigkeit innerhalb 6 m nicht ganz erreicht wird.

Bei einem andern Versuchsorgan, welches ebenfalls die ersten 3 m in 1,4 Sekunden durchfiel, entfernte ich die Haarbekleidung der Nuss, um deren Einfluss auf den Luftwiderstand erkennen zu können. Ich hatte geschlossen, dass dieselbe ungünstig für die Ausnützung des Fallschirmes sein müsse, weil sie die Nuss zu sehr verdicke und so die abfliessende Luft zu weit gegen den Rand des Fallschirmes leite. Der Versuch rechtfertigte diese Anschauung, denn nach Entfernung der Haare brauchte das Organ zum Zurücklegen der ersten 3 m 1,7—1,75 Sek., was nur zum bei weitem kleinsten Theile auf Rechnung des sehr wenig veränderten Gewichtes zu setzen war, wie ich hier nicht im Einzelnen ausführen will.

Organe mit aus Haaren gebildetem Fallschirm übergehe ich hier um so mehr, als nur die Formen mit ganz dicht stehenden Strahlen, welche gewissermassen eine geschlossene Widerstandsfläche besitzen, zu dem Haupttypus gerechnet wurden. Deren Verhalten ist vollständig gleich demjenigen der untersuchten Asterocephalusfrucht. Das Verhalten des Haarapparates für sich ist ohnehin bei den haarförmigen Organen ausreichend gewürdigt worden. Formen mit we-

nigen, nicht dicht gestellten, haarigen Strahlen bilden Zwischentypen und nähern sich den haarförmigen Organen. Ihre Leistungsgrösse steigt mit Verminderung der Haare, da die Lufthülle der einzelnen Haare zur vollen Ausnützung gelangt.

Leistungsgrösse des Typus.

Dieselbe hängt ausser von der Grösse der Horizontalprojektion auch von der Gestalt der Widerstandsfläche ab. In Folge der Tieflage des Schwerpunktes sind hier stabile Widerstandsflächen möglich, wie sie sonst bei keinem Typus vorkommen. Von verlängert (spitz) kegelförmiger (fast walzenförmiger) Gestalt bis zu konkav halbkugelförmiger können sie variiren. Die ersteren kommen häufig in jeglicher Gestalt vor, von den letzteren sind mir in einigermassen reiner Form bis jetzt keine Beispiele bekannt geworden, indess ist die Möglichkeit ihres Auftretens gegeben. Je nach der verschiedenen Konstruktion schwankt aber damit die Leistungsgrösse zwischen sehr weiten Grenzen. Das Versuchsorgan von Asterocephalus fiel in der Sekunde 3,8 m, wogegen die Berechnung nach der Projektionsgrösse für $3 = 1$ nur 1,69 m ergibt. Die Leistungsgrösse dieses Organes beträgt also $\frac{1{,}69}{3{,}8} = 0{,}44$. Aber diese Zahl kann offenbar noch weiter herabsinken. Die untere Grenze ist mir unbekannt, immerhin stellt 0,44 schon eine sehr geringe Leistungsgrösse dar. Besässe das Organ eine schwach konvexe Widerstandsfläche vom Koeffizienten $= 1$, so wäre die Leistungsgrösse $\frac{1{,}69}{1{,}69} = 1$; wäre die Widerstandsfläche ganz eben, so würde die Fallgeschwindigkeit etwa 1,46 m betragen (für den Koeffizienten $\frac{4}{3}$) und die Leistungsgrösse wäre $\frac{1{,}69}{1{,}46} = 1{,}15$. Besässe endlich die Widerstandsfläche die denkbar günstigste, nämlich konkav halbkugelförmige Gestalt, so betrüge die Fallgeschwindigkeit etwa 1,07 m (berechnet aus dem Koeffizienten $\frac{5}{2}$) und die Leistungsgrösse betrüge $\frac{1{,}69}{1{,}07} = 1{,}58$. Wenn

auch diese alleroberste Grenze in Wirklichkeit kaum erreichbar ist, so kann man doch allgemein sagen, dass Schwankungen beiläufig zwischen 0,4 und 1,5 möglich sind. Den alleruntersten Leistungsgrössen würden sich diejenigen der Organe mit sehr verlängert kegelförmiger oder eigentlich richtiger zylindrischer Schirmfläche anschliessen, wie sie die Früchtchen von manchen Rosaceen und Ranunculaceen ergeben. Es ist dann schliesslich, wenigstens wenn die Haarschöpfe gerade sind, nur mehr parallele Reibung als den Luftwiderstand beim senkrechten Fall erhöhend wirksam.

Mechanik der Einstellung.

Das Verhalten der vom Luftwiderstand getroffenen Organe ist ähnlich wie das der vorhergehenden VI. Gruppe von Flugkörpern, welche sich im wesentlichen nur dadurch unterscheiden, dass ihr Schwerpunkt innerhalb der Umgrenzung der Widerstandsfläche selbst liegt.

Die Mechanik der Vorgänge ist so vollkommen übereinstimmend, dass ich in Bezug auf die Einzeldarstellung, um Wiederholung zu vermeiden, darauf verweise. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass durch die Verlegung des Schwerpunktes bei etwaiger Schiefstellung die wirksamen Hebelarme der statischen Momente der angreifenden Drehkräfte verlängert sind. Damit wächst aber gleichzeitig das Stabilitätsmoment der Organe. (Vgl. Fig. 8, Taf. IV.)

Die Mechanik der etwa vorkommenden Drehungen um die Vertikalaxe ist einfach. Geneigte Randflächenpartien, welche horizontal gerichtete Druckkomponenten erzeugen, und nicht durch andere antagonistisch geneigte kompensirt werden, verursachen sie. So bei manchen, Schirme aus Fiederhaaren tragenden Achenen eine geringe Drehung der Pappusstrahlen um ihre Längsaxe. Diese wenig beschleunigten Drehungen haben aber absolut keine Bedeutung für die Verzögerung des Falles, indem die Rotationsebene genau senkrecht zur fortschreitenden Bewegungsrichtung steht und zwei zu einander rechtwinklich gerichtete Geschwindigkeiten nach mechanischen Gesetzen bekanntlich keinen Einfluss auf-

einander ausüben. Nur wenn in die Richtung der fortschreitenden Bewegung fallende Komponenten erzeugt werden, ist im widerstehenden Medium ein solcher Einfluss möglich. Auch die Grösse der wirksamen Projektionsfläche wird durch die Rotation nicht geändert. Die günstigste Fallstellung ist ohnehin stabil.

Die Formen mit sehr verlängerter, spitz kegelförmiger, oder auch nahezu oder vollkommen walzenförmiger Fläche, wie sie die langen Haarschöpfe mancher Rosaceen- und Ranunculaceen-Früchtchen zeigen, könnte man mit einem gewissen Recht auch als einen besonderen Haupttypus aufstellen, indem hier, wenigstens bei den geraden Formen, wesentlich die parallele Reibung den Luftwiderstand beim senkrechten Fall erhöht. Sind die gefiederten Haaranhänge gekrümmt (manchmal mehr oder weniger spiralig), so entstehen natürlich in die Bewegungsrichtung fallende direkte Widerstandskomponenten. Bei gleichsinnig spiraliger Drehung entstehen durch die gleichsinnig wirkenden, horizontalen Widerstandskomponenten Drehungen um die Längsaxe, welche gleichsinnig mit der spiraligen Krümmung vor sich gehen.

VIII. Haupttypus.

Die flügelwalzenförmigen Flugorgane.

(Taf. I, Fig. VIII, 1 u. 2; Taf. II, Fig. 5 u. 6. Vgl. Fig.-Erkl.)

Es sind 3- bis mehrflügelige Organe, welche entweder aus einer sternförmig ausgebildeten Nuss ohne besondere Flügel, nämlich aus flach zusammengedrückten, der Länge nach verwachsenen Platten bestehen, oder aus einer bald kurz- bald langzylindrisch oder prismatisch gestalteten Nuss, an welche der Länge nach häutige Flügel angeheftet sind. Im vertikalen Querschnitt stellen die Organe regelmässige 3- bis mehrstrahlige Sterne dar. Der Schwerpunkt liegt median. Gleichgewichtslagen wenig stabil. Die Fallbewegung in ruhiger Luft findet unter beschleunigter senkrechter Rotation um die jeweilige, im Raum horizontale Axe statt. In vertikaler Projektion stellt die Schwerpunktsbahn eine aufwärts konkave Kurve von anfangs zunehmender, dann wieder abnehmender Krümmung dar, welche sich unter abnehmendem Neigungswinkel zur Horizontalen einer geraden Linie nähert. In Horizontalprojektion ist die Bahn mehr oder weniger gekrümmt. Dieselbe stellt im Allgemeinen eine, meist ziemlich steil verlaufende spiralige Raumkurve dar. In Folge etwas erhöhter Ausnützung des Luftwiderstandes durch die lebendige Kraft der beschleunigten Drehung ist die Fallgeschwindigkeit im Verhältniss zur Flächenentwicklung nicht unbedeutend verzögert.

Hierher sind beispielsweise zu rechnen von 3-flügeligen Formen die Früchte mancher Polygonum-Arten, von Rheum, Thalictrum aquilegifolium; von 4-flügeligen die Früchte von Halesia (Styracac.), Spathelia (Simarubac.), Reisseckia (Rhamnac.), Roepera (Zygophyll.), Tetrapterygium (Crucif.); von

5-flügeligen die Früchte von Pentaptera, Chuncoa (Combretac); von 6-flügeligen die Früchte von Hexaptera (Crucif.) und von vielflügeligen diejenigen vieler Malpighiaceen.

Die Drehbewegung der hierhergehörigen Formen, sowie ihre Fallbahn, entspricht im Prinzip vollkommen derjenigen des nächsten (IX.) Typus, nur besitzen die Organe in der Luft relativ geringe Stabilität ihrer Drehaxen und die Bahn des Schwerpunktes wird, wie bei den sehr beschleunigt drehenden Formen jenes Typus eine nahezu einfache Kurve. Letztere weicht übrigens, in Folge des durchschnittlich bedeutend grösseren Gewichtes der Körper, entsprechend weniger von der lothrechten Richtung ab. Mit der Zunahme der Zahl der Flügel über 4 nimmt die Stabilität ab, ebenso mit der Verminderung auf 3. Am stabilsten sind die 4-flügeligen Formen, welche in der Mitte rechtwinklich sich durchschneidende, ebene Platten darstellen. Die Trägheitsmomente der Körper in Bezug auf ihre Hauptträgheitsaxen nähern sich, wenn die Organe nicht stärker verlängert sind, sehr. Das Moment der drehenden Kräfte des Luftangriffs überwiegt das Moment der Centrifugalkräfte. Bei den 3-flügeligen Formen sind die Drehungen um drei unter 60^0 resp. 120^0 sich schneidende, theoretisch nicht stabile Queraxen (z, x, w Fig. 9 Taf. IV) in der Luft am stabilsten, bei den 4-flügeligen die Drehungen um 4 unter 45^0 resp. 135^0 sich schneidende (z, z', x, x' Fig. VIII, 2 Taf. I), und bei den 5-flügeligen die Drehungen um 5 unter 36^0 resp. 144^0 sich schneidende Queraxen (z, x, w, v, u Fig. 10 Taf. IV). Die einzige theoretisch stabile Axe der Körper, die in der Durchschnitts- resp. Verwachsungslinie der Flügel verlaufende Längsaxe (y Fig. VIII, 1 Taf. I) ist dagegen nicht stabil.

Die Gründe der besonders ausgeprägten Stabilität der Drehungen um die genannten Queraxen bei den 4-flügeligen Formen gegenüber den weniger- und mehrflügeligen liegen übrigens so klar auf der Hand, dass ich darauf nicht weiter eingehen zu sollen glaube. Die Verhältnisse entsprechen hier am meisten denen bei dem folgenden Typus.

Die Gründe der geringen Stabilität bei Drehung um die in horizontaler Stellung befindliche Längsaxe liegen darin, dass gleichzeitig Drehkräfte von wachsendem statischen Moment erzeugt werden, welche zunehmende Schwankungen um eine, im Raume mehr oder weniger schief gerichtete Queraxe erzeugen. Mit der Zunahme des Winkelausschlages dieser Schwankungen vermindert sich die Geschwindigkeit der ursprünglichen Drehung, indem die bezüglichen Drehkräfte abnehmen. Dafür kommen nun mit steigender Intensität andere Drehkräfte zur Wirkung, welche ebenfalls Schwankungen und schliesslich beschleunigte Drehungen um die im Raum horizontale Queraxe erzeugen. Hiermit ist dann die endgültige Bewegung gegeben.

Früchte von Combretum spec. (Combretac.).

Die benützten, aus Brasilien stammenden Exemplare gehören der königlichen Staatssammlung in München an. Die Organe (Taf. II, Fig. 5, a und b) stellen im vertikalen Querschnitt ein gleicharmiges Kreuz dar, welches gebildet wird durch 2 gleichgrosse, rechtwinklich sich durchschneidende, dünne ebene Platten von rundlich dreieckiger Gestalt. Der bei weitem grösste Theil des Körpers wird von der Nuss gebildet, welche von ganz schmalen häutigen Flügelrändern umzogen wird. Die Organe fallen in ruhiger Luft, unter ziemlich beschleunigter Drehung um eine, ihren Ort im Körper leicht wechselnde Axe, welche im Raum immer horizontal ist, in steiler Schraubenlinie zu Boden.

Ein Versuchsorgan durchfiel (ebenso wie zwei weitere geprüfte Exemplare) 6 m Fallhöhe in 2 Sek. Fallzeit und zwar je den 1.—3. und 4.—6. m in 1 Sekunde. Die Fallgeschwindigkeit betrug somit 3 m in der Sekunde. Für die Erklärung dieser auffallend gleichbleibenden Fallgeschwindigkeit verweise ich auf den folgenden Typus. Der Radius der schraubigen Bahn betrug im unteren Theil derselben etwa $^1/_3$ m.

Die grösste Projektionsfläche des Versuchsorganes betrug, entsprechend der Fläche einer der sich kreuzenden Platten 132,7 qmm, sein Gewicht 122,3 mgm. Führen wir diese Grössen in unsere Widerstandsformel ein, wobei wir

für den Koeffizienten 3 den für ebene Flächen früher angegebenen Werth $\frac{4}{3} = 1{,}33$ setzen, so bekommen wir

$$v = \sqrt{\frac{19620 \cdot 122{,}3}{0{,}001293 \cdot 132{,}7 \cdot 1{,}33}}$$

$$v = 3{,}238 \text{ m}$$

also eine Geschwindigkeit, welche um etwa das 1,08fache die beobachtete übersteigt. Es fällt dieses Mehr, wie man sieht, noch in die Fehlergrenzen der Berechnungsmethode, indessen ergaben Versuche mit einem etwas grösseren Modell aus zwei kreisrunden senkrecht sich durchschneidenden Papierscheiben ein ähnliches, noch etwas darüber hinausgehendes Resultat, nämlich das 1,094fache.

Die Art und Weise der Drehung liess sich an den kleinen Früchten nicht hinreichend genau verfolgen, wesswegen ich sie an dem ebengenannten, den Früchten in der Gesammtgestalt nahekommenden, sowie einem ganz gleichgestalteten vergrösserten Papiermodell, welche beide auf einer Seite mit rother Farbe überzogen waren, beobachtete. Es stellte sich dabei heraus, dass bei solchen Körpern nicht die Drehungen um die im luftleeren Raume stabilste Hauptträgheitsaxe des kleinsten Trägheitsmomentes die relativ stabilsten sind, sondern solche um vier dazu senkrecht gerichtete Axen, welche sich unter Winkeln von 45^0 resp. 135^0 schneiden. Alle beliebigen anderen Drehungen gehen in solche über. Die erstgenannte Axe (y Fig. VIII, 1 Taf. I), welche ich Längsaxe nennen will, fällt mit der Schnittlinie der beiden sich kreuzenden Platten zusammen. Von den 4 anderen kreuzt sich je ein Paar (x z und x' z' Fig. VIII, 2 Taf. I) rechtwinklich. Beide Paare besitzen theoretisch gleiche Trägheitsmomente. Das eine Paar (x' z') stellt Flächenaxen dar, von welchen jede innerhalb einer und senkrecht zur anderen Platte verläuft, das zweite Paar (x z) liegt mit dem ersteren in einer Ebene und fällt in die Mitte zwischen je zwei Platten, wesswegen man die Axen Zwischenflächenaxen nennen kann.

Lässt man das Modell mit senkrecht gerichteter Längsaxe fallen, so beginnt es sofort sich entweder um eine der genannten beiden Flächenaxen, welche sich dann horizontal

stellt, oder um eine sich ebenso einstellende Zwischenflächenaxe zu drehen, und zwar erhalten sich die einmal eingeleiteten Drehungen, welche mit ziemlich gleicher Geschwindigkeit vor sich gehen, soweit ich bei der Fallhöhe von 6 m beobachten konnte, dauernd. Die Rotationsebene ist immer eine senkrechte. In diesem Falle ist die Abweichung der Bahn von der lothrechten am stärksten und betrug bei dem aus kreisförmigen Scheiben hergestellten Modell, welches sich, horizontal projizirt, in fast ganz gerader Linie bewegte auf 6 m Fallhöhe c. 3 m.

Fiel das Modell aus horizontaler Lage seiner Längsaxe, so fing es langsam an, sich um diese zu drehen und fiel dabei anfangs lothrecht abwärts. Erst allmählich beschleunigt sich die Drehung und nun krümmt sich die Bahn in der Richtung der Rotationsebene mehr und mehr. Die Längsaxe ist aber bei Drehung in der Luft die am wenigsten stabile Axe, in Folge dessen geht die Drehung um sie rasch über in Drehung um eine der Flächenaxen oder der Zwischenflächenaxen. Letztere Drehungen erhalten sich, indem der Luftwiderstand etwaige Zwischenstellungen in die Horizontalstellung der nächstgelegenen Flächenaxe oder Zwischenflächenaxe überzuführen bestrebt ist. Nur in diesen Stellungen ist die algebraische Summe der statischen Momente in Bezug auf die Längsaxe gleich Null.

Früchte von Halesia tetraptera (Styracac.).

Dieselben stellen nach demselben Prinzip wie die vorigen gebaute 4-flügelige Früchte dar, welche jedoch eine, im Verhältniss zu den schmalen Flügeln sehr grosse und schwere Nuss besitzen. (S. Fig. 6, a u. b Taf. II.) Ausserdem sind die Organe in der Richtung der Längsaxe etwas verlängert. Die Nuss wird gebildet von einem an beiden Enden zugespitzten, walzlichen oder mehr vierseitig prismatischen Körper, dessen Kanten in schmale Flügel ausgezogen sind.

Ein Versuchsorgan, dessen grösste Projektionsfläche von breit lanzettförmiger Gestalt auf 25 mm Länge $15^1/_2$ mm grösste Breite besass, hatte einen Flächeninhalt seiner grössten Projektionsfläche von 242 qmm und wog 338,5 mgm. Das-

selbe durchfiel, aus horizontaler Stellung seiner Längsaxe fallen gelassen 6 m Fallhöhe in 1,8 Sek., von welchen die Hälfte auf je drei Meter kam. Die Fallzeit betrug also 0,9 Sek. auf 3 m oder 3,3 m pro Sekunde. Die Bahn war anfangs lothrecht und ging nach etwa $^1/_3$ Fallraum in eine steile Spirale über von etwa $^1/_2$ m Radius. Dabei drehte sich das Organ mit beschleunigter Geschwindigkeit anfangs um seine horizontal gestellte Längsaxe. Der spätere Fallverlauf ging zu rasch vor sich und musste aus zu grosser Entfernung beobachtet werden um das Verhalten genauer verfolgen zu können. Jedenfalls stellte sich aber die Längsaxe rasch schief und schliesslich in die Richtung der ursprünglichen Rotationsebene selbst ein, so dass Stellungen, welche ganz derjenigen der vorhergehenden Form entsprachen, eintraten. Es ging dies aus Fallversuchen mit entsprechend gestalteten vergrösserten leichten Papiermodellen hervor, deren Nuss aus einem hohlen Zylinder bestand und deren Oberfläche einerseits roth gefärbt war.

Wenn wir hier mittelst der gemessenen Grössen eine Berechnung der theoretischen Fallgeschwindigkeit versuchen, so ist diese nur sehr approximativ möglich, da ein auch nur einigermassen richtiges Abschätzen des Koeffizienten 3 so gut wie unmöglich ist. Nehmen wir ihn versuchsweise = 1, so erhalten wir

$$v = \sqrt{\frac{19620 \cdot 338{,}5}{0{,}001293 \cdot 242}}$$

$$v = 4{,}607 \text{ m}$$

also einen ansehnlichen Unterschied gegenüber dem beobachteten Resultat. Die Fallgeschwindigkeit ist somit eine wesentlich geringere als sie es vermöge der Masse und grössten Flächenentwicklung des Körpers sein sollte. Es liegt dies auch hier wieder an der erhöhten Ausnützung des Luftwiderstandes durch die lebendige Kraft der beschleunigten Drehung.

Auf die Mechanik der Vorgänge will ich hier nicht weiter eingehen, als es bereits in den allgemeinen Bemerkungen über die Axenverhältnisse des Typus geschehen ist.

Wie schon früher bemerkt, beruhen die Drehungserscheinungen beim V., VIII. und IX. Typus auf den nämlichen mechanischen Gründen und verlaufen auch ganz ebenso. Die wesentliche Besonderheit des VIII. Typus liegt darin, dass relativ stabile Drehungen um mindestens 3 theoretisch nicht stabile Axen möglich sind.

Es wäre möglich, dass manche der nach diesem Typus gebauten Organe, speziell die stärker verlängerten Formen, eine Funktion als Rollorgane ausüben. Es ist mir indessen nichts darüber bekannt geworden.

Leistungsgrösse des Typus.

Wenn wir beim ersten berechneten Versuchsorgan von Combretum spec. 3 = 1 setzen, so erhalten wir als theoretische Fallgeschwindigkeit bei stabil horizontaler Flächenstellung ohne Drehung 3,74 m, also beträgt die Leistungsgrösse $\frac{374}{300} = 1{,}24$. Beim zweiten Versuch mit Halesia tetraptera erhielten wir anstatt der beobachteten 3,3 m 4,607 m theoretische Geschwindigkeit. Die Leistungsgrösse beträgt danach $\frac{4607}{3300} = 1{,}39$. Die beiden Resultate zeigen somit, dass die Leistungsgrösse des VIII. Typus in Folge der beschleunigten senkrechten Drehung ziemlich bedeutend über 1 hinausgeht.

IX. Haupttypus.

Die länglich plattenförmigen Flugorgane.

(Taf. I, Fig. IX, 1—3; Taf. II, Fig. 7, 8 u. 9; vgl. Fig.-Erkl.)

Die Organe stellen typisch dünne ebene Platten von länglichem Umriss mit medianem Schwerpunkt dar. Sie sind entweder flügellos, oder eine mediane, mehr oder weniger flach zusammengedrückte Nuss ist von einem ebenen Flügel umzogen. Der Flügel geht entweder ringsum und ist nur nach zwei Seiten besonders verlängert oder er ist nach zwei Seiten unterbrochen, so dass das Organ zweiflügelig erscheint. Oft kommen mehr oder weniger starke Flächenkrümmungen vor, entweder einseitige Wölbungen oder schraubenförmige Krümmungen. Die Fallbewegung findet unter sehr beschleunigter, senkrechter Rotation um die, wenigstens anfangs in stabil horizontaler Gleichgewichtslage eingestellte Längsaxe statt. Da diese eine freie und gleichzeitig die stabilste Axe der Organe ist, so zeigt sie bei den rascher drehenden Formen die charakteristischen Erscheinungen der Axenneigung. Die Bahn des Schwerpunktes in ruhiger Luft ist in der Vertikalprojektion eine gekrümmte Wellenlinie, deren sekundäre Kurven mit zunehmender Rotationsgeschwindigkeit immer flacher werden und welche unter abnehmendem Neigungswinkel zur horizontalen sich immer mehr gerader Richtung nähert. In der Horizontalprojektion wäre sie theoretisch eine gerade Linie, in Wirklichkeit ist sie aber in Folge ausnahmslos vorhandener geringer Unsymmetrieen immer gekrümmt. Im allgemeinen stellt sie eine, genau genommen aus kleinen sekundären Kurven zusammengesetzte, spiralige Raumkurve

von äusserster Komplikation dar. Die Fallgeschwindigkeit ist in Folge erhöhter Ausnützung des Luftwiderstandes durch die lebendige Kraft der beschleunigten Drehung eine im Verhältniss zur Flächenentwicklung bedeutend verzögerte.

Beispiele: Mit etwas schraubig gedrehtem, langem schmalem Flügel umzogene Früchte von Ailanthus glandulosus (Simarubac.) u. a. Arten d. Gattung. Lange, platte, nicht aufspringende Hülsen von Martia parvifolia (Caesalpin.), Dalbergia variabilis und riparia, Platymiscium, Hymenolobium (Papilionac.).

Die Samen mehrerer Entada-Arten (Papilionac.), welche durch das von der Hülse sich loslösende, sie fest einschliessende Endokarp einen Flügel erhalten.

Zahlreiche Bignoniaceen-Samen (z. B. von Tecoma stans, Bignonia unguis u. a.) mit nach zwei Richtungen sehr verlängertem, dünnhäutigem Flügel.

Der Schwerpunkt der Körper fällt typisch in den geometrischen Mittelpunkt. Die drei, den Hauptdimensionen entsprechenden Schwerpunktsaxen, die Längs-, Quer- und Vertikalaxe (z, x und y Fig. IX, Taf. I), stellen in typischen Fällen Symmetrieaxen dar und fallen mit den 3 freien oder Hauptträgheitsaxen der Körper zusammen. Die Längs- und die Vertikalaxe sind zugleich theoretisch stabile Axen.

Da bei diesem Typus beschleunigte Drehungen typisch sind, so haben die Axenverhältnisse eine grössere Bedeutung. Gehen wir von einer dünnen, rechteckigen, homogenen Platte mit geradlinigen Kanten als dem einfachsten entsprechenden Modell aus. Von der einfachen quadratischen Platte, wo die den Kanten parallelen, in der Fläche verlaufenden zwei Hauptträgheitsaxen einander gleich sind, und nur eine stabile Axe vorhanden ist, nämlich die zur Fläche vertikale, wachsen bei längerwerden einer im übrigen gleich breiten Platte die Trägheitsmomente in der Weise an, dass dasjenige in Bezug auf die Längsaxe nur langsam, in einfachem Verhältniss steigt, wogegen diejenigen in Bezug auf

die Queraxe und die Vertikalaxe so rasch zunehmen, dass bei doppelter Länge das erstere das achtfache, das letztere das fünffache der entsprechenden Axe der quadratischen Platte beträgt. Dabei nähert sich das Trägheitsmoment in Bezug auf die Queraxe immer mehr demjenigen in Bezug auf die Vertikalaxe, so dass, wenn sich die Länge zur Breite der Platte wie 7 zu 5 verhält, die Trägheitsmomente in Bezug auf Längs- und Vertikalaxe bereits gleichweit von dem der mittleren (Quer-) Axe abweichen. Bei dieser Massenvertheilung sind also die erstgenannten beiden Hauptträgheitsaxen theoretisch gleich stabil. Darüber hinaus wird der Abstand des Trägheitsmomentes in Bezug auf die Längsaxe von dem der mittleren Axe sehr viel bedeutender, als derjenige des Trägheitsmomentes der Vertikalaxe, und damit überwiegt immer mehr die Stabilität der Längsaxe für den Fall gleicher Rotationsgeschwindigkeit.

Das bisher gesagte gilt für homogene ebene Platten. Ebenso verhalten sich aber auch die hieher zu rechnenden natürlichen Objekte. Wenn die Organe nicht ganz gleich dick oder gleich homogen sind, so befinden sich die etwaigen Verdickungen und gröberen Ungleichheiten in der Mitte des Organes um die Nuss, also um den Schwerpunkt und stellen selbst wieder eine oder mehrere Schichten länglicher Platten dar mit mehr oder weniger ähnlicher Massenvertheilung, wie sie die Flügel selbst besitzen. Die Nuss selbst ändert im Prinzip dieses Verhältniss nicht, auch wenn dieselbe, was nicht leicht vorkommt, sogar kugelig wäre. Im letztern Fall würden die Trägheitsmomente in Bezug auf die sämmtlichen 3 Hauptträgheitsaxen um den gleichen Betrag anwachsen, nachdem aber der Radius dieser Massentheilchen sehr gering ist, so mindern sich die Unterschiede der einzelnen Trägheitsmomente nur innerhalb ziemlich enger Grenzen.

Also Regel bei den Körpern dieser Kategorie ist, dass die Längsaxe theoretisch die stabilste, die Vertikalaxe eine weniger stabile Drehaxe darstellt, und dass mit Zunahme der Länge die Stabilität der Längsaxe wächst.

In der Luft verhält sich zwar die Sache umgekehrt, indem die Längsaxe die Axe des grösseren und die Vertikalaxe diejenige des geringeren (d. h. des geringsten) Luft-

widerstandes darstellt, wenigstens bei nicht allzu überwiegender Längendimension, jedoch fehlt typisch für die Erzeugung von beschleunigteren Drehungen um die letztere Axe in Folge der medianen Lage des Schwerpunktes die Möglichkeit ausreichenden Angriffs.

Wenn die Verlängerung der Organe nicht bedeutend ist und wenn letztere gleichzeitig im Verhältniss zu ihrer Fläche allzu wenig Masse besitzen, gestattet der Widerstand der Luft trotz der verlängert plattenförmigen Gestalt nicht oder kaum, dass beschleunigte Rotation zu Stande kommt. Solche Organe, wozu beispielsweise die Samen der Bignoniacee Tecoma radicans gehören, verhalten sich ähnlich, wie die Organe der V. Gruppe, sie drehen sich mit sehr geringer Geschwindigkeit um ihre horizontal gestellte Längsaxe, oder sie drehen sich in manchen Fällen auch gar nicht, sondern schwanken dauernd um ihre horizontal gestellte Queraxe auf und ab. Letzterer Fall tritt dann ein, wenn ausserdem ihre Fläche in querer Richtung etwas gekrümmt, oder in Folge sehr grosser Zartheit des Flügels elastisch biegsam ist. Organe, welche das zuletzt genannte Verhalten zeigen, stellen einen einfachen Zwischentypus zwischen dem VI. und IX. Haupttypus dar.

Im übrigen aber ist bei Betrachtung der Funktion der Organe des vorliegenden Typus noch folgendes zu bemerken:

Wir befinden uns hier in dem speziellen Falle, von welchem in der „Eintheilung“ gesprochen wurde. Die sämmtlichen mir bekannten hierher gehörigen natürlichen Organe besitzen zwei Funktionsformen: Erstens die typische, in Gestalt einer beschleunigten Drehung um die horizontal gestellte Längsaxe, welche eine gekrümmte, windschiefe Bahn erzeugt, und zweitens eine geradlinige senkrechte Bewegung mit oder ohne wenig beschleunigte horizontale Rotation um die senkrecht gestellte Vertikalaxe. Letztere Bewegung fällt vollständig zusammen mit derjenigen, welche die drehenden Formen des VI. Typus zeigen. Charakteristisch für den IX. Typus ist natürlich nur die erstere, wie sie namentlich bei den stärker verlängerten Formen zum typischsten Ausdruck kommt.

Ich werde bei den geprüften Organen indessen gleich-

wohl auch die zweite Funktion in Kürze berücksichtigen, indem ich hier ja nicht blos eine, von dem Verhalten der natürlichen Objekte absehende, rein mechanische Betrachtung zu geben beabsichtige. Der Unterschied in der jeweiligen Leistungsfähigkeit der beiden Funktionen wird ausserdem dadurch um so mehr in die Augen springen. Das Verhältniss der Verbreitung beider Funktionsarten bleibt weiter zu untersuchen. Die Frage danach ist um so interessanter, als die typische Funktion des IX. Typus, wie wir sehen werden, ziemlich viel mehr leistet als die letztere.

Früchte von Ailanthus glandulosus (Simarubac.).

Die Früchte (Fig. 8 Taf. II) stellen eine papierdünne steife Platte dar von im Durchschnitt 36 mm Länge und 11 mm grösster Breite. Sie bestehen aus einem kleinen, flach linsenförmig zusammengedrückten Nüsschen und einem, dieses rings umziehenden, nach 2 Richtungen sehr verlängerten, grossen, etwas unsymmetrischen Flügel. Der Schwerpunkt liegt nicht ganz in der Längsmitte, sondern ist etwas gegen die breite, lanzettförmige Flügelhälfte verschoben. Er fällt fast genau in die Mitte des Nüsschens. Die breitere Flügelhälfte ist namentlich gegen ihr Ende zu um einen Winkel von ca. 135° schraubig um die Längsaxe gedreht. Die gegenüber liegende schmälere, aber etwas längere Flügelhälfte ist mehr lineal, viel flacher und meist nur gegen ihr Ende (den Ansatzpunkt des Fruchtstieles, an welchem die reife Frucht herabhängt) ein wenig stärker in der Fläche gekrümmt. Diese Krümmung ist aber meist nur eine Längskrümmung. Wenn gleichzeitig eine ganz geringe Drehung um die Längsaxe damit verbunden ist, so hat dieselbe meist umgekehrten Sinn, wie die Drehung der andern Flügelhälfte.

Lässt man eine solche Frucht in der Stellung, wie sie reif am Baume hängt, d. h. mit dem Stielende senkrecht nach oben gerichtet fallen, so dreht sie sich gleichzeitig um ihre Queraxe, indem sie sich horizontal stellt, und um ihre Längsaxe, in der Richtung der Schraubenwindung. Während die erstere Drehung eine Amplitude von 90° besitzt, macht die zweite eine solche von 180° und bei einem Versuchsobjekte wurden während 20 cm Fallhöhe die genannten beiden

Drehungen vollzogen, so dass sich dann die Frucht in horizontaler Lage befand. Gleichzeitig wich dieselbe seitlich um etwa 5 cm von der lothrechten Fallbahn ab, indem sie eine kurze steile Spirale beschrieb, welche der Drehung um die Längsa[illegible]hsinnig war, aber nur einen sehr kleinen Theil eines Umganges betrug.

In der horizontalen Lage machte das Organ, während es einen weiteren Fallraum von 6—8 cm zurücklegte, eine horizontale Drehung um seine im Raume vertikale Schwerpunktsaxe und ging dann plötzlich in beschleunigte Vertikalrotation um seine Längsaxe über. Von dem Augenblicke des Beginnes dieser letzteren Drehung, welche aber in umgekehrter Richtung verlief, wie die schraubige Krümmung der breiteren Flügelhälfte, bewegte es sich durch einen Fallraum von 30 bis 40 cm in einer, unter einem Winkel von ca. 45^0 zur horizontalen geneigten, fast geradlinigen und nur ganz wenig nach aufwärts konkav gekrümmten Bahn. Bei noch weiterem Fall machte die Bahn sodann eine S förmige Krümmung, indem sie zuerst ein kurzes Stück einer linkswendigen und dann durch einen Wendepunkt durchgehend eine dauernd rechtswendige Spirale beschrieb, welche nach unten immer enger und steiler wurde. Das schmälere (Stiel-) Ende des Flügels neigte sich dabei gleichzeitig immer mehr nach ab- und vorwärts und war schliesslich unter einem Neigungswinkel von 27^0—30^0 gegen die konkave Seite der Kurve gerichtet, in welcher Stellung das Organ nun bis zum Auffallen verblieb. Die im obersten Theil mit etwa 30 cm Radius beschriebene und in einem umgekehrten Kegelmantel verlaufende, allmählig steiler werdende Spiralbahn ging nach einer Fallhöhe von etwa 140 bis 160 cm in eine ziemlich gleichförmige Zylinderschraubenbahn mit einem Radius von etwa 12—15 cm über und verharrte nun in dieser bis zum Boden.

Ausnahmsweise kam es vor, dass das Organ vor dem Übergang zur Rotation um seine Längsaxe mehrere Umdrehungen um die Vertikalaxe machte und so erst etwas später zu seiner endgültigen Bewegung gelangte. Bei anderen Früchten dieser Art kommt es manchmal vor, dass sie dauernd nur um ihre Vertikalaxe rotiren und dann eine fast

senkrechte Bahn ihres Schwerpunktes beschreiben. Meistens funktioniren sie aber wie vorher geschildert, gehen wenigstens früher oder später zu dieser Bewegungsart über.

Was die Fallgeschwindigkeit angeht, so wurden, wenn die senkrechte Rotation sogleich begann, wie oben beschrieben, von dem gleichen Versuchsorgan 3 m Fallhöhe in 4 Sek. durchfallen, und zwar

die ersten 50 cm in 0,9 Sek.
weitere 50 cm „ 0,6 „
„ 100 cm „ 1,2 „
„ 100 cm „ 1,3 „

Begann die senkrechte Rotation nicht sofort, sondern dauerte die horizontale länger an, so verminderte sich die Fallzeit bedeutend. Die ersten 50 cm wurden dann schon in 0,6 Sek. durchfallen.

Unter 13 Früchten gingen 9 verschieden rasch in senkrechte Rotation um die Längsaxe über und bewegten sich in sehr wechselnden Bahnen von fast geradliniger schief zur Erde geneigter bis zu eng spiraliger Bahn mit $1^1/_2$ bis 3 Umgängen. Die Fallzeit schwankte zwischen 3,2 und 4,8 Sekunden, wobei die erstere nur vorkam, wenn ein grösserer Theil des Fallraumes horizontal drehend durchfallen wurde. In 4 Fällen wurde der ganze Fallraum von 3 m in horizontaler Rotation um die Vertikalaxe durchfallen, hier aber war die durchschnittliche Fallzeit 2,95 Sek. und schwankte in den einzelnen Fällen nur um 0,2 Sekunden.

Ein Organ, welches den Mittelwerthen aus einer grösseren Zahl von Früchten nahekommende Verhältnisse zeigte, wurde zu einem Berechnungsversuch ausgewählt. Bei demselben betrug das Gewicht der ganzen Frucht 0,0225 grm, hievon wog die Nuss 0,0136 und der Flügel 0,0089 grm. Der Flächeninhalt der ganzen Frucht, wenn der Flügel flach ausgebreitet wurde, war 220,7 qmm, wovon auf die im Umriss kreisförmige Nuss 21,64 und auf den Flügel 199,06 qmm kamen. In dem Zustande der natürlichen Flächenkrümmung betrug die grösste Projektionsfläche dagegen nur 188,2 qmm.

Dieses Organ durchfiel 6 m in 6,8 Sek. und zwar hievon
die ersten 3 m in 3,3 Sek.
„ letzten „ „ „ 3,3 „ , somit je 1 m in 1,1 Sek

Die letztere Fallgeschwindigkeit entspricht 0,91 m pro Sekunde und beschleunigt sich nicht weiter, was aus dem Umstande, dass die erzeugte Spiralbahn sich während der letzten 3 m nicht weiter verengerte, mit Sicherheit geschlossen werden kann. Fügen wir die erhaltenen Grössen für w und f in unsere Gleichung ein, so ist zu bemerken, dass wir für letzteres die grösste Projektionsfläche mit 188,2 qmm anzuwenden haben. Die Grösse des Coeffizienten 3 ist unberechenbar. Zum Vergleich mit den Resultaten bei ganz ebenen regelmässig gestalteten Modellen nehmen wir denselben, im übrigen wohl etwas zu gross, gleich 1 an. Wir erhalten dann

$$v = \sqrt{\frac{19620 \cdot 22{,}5}{0{,}001293 \cdot 188{,}2}}$$

$$v = 1{,}347 \text{ m}$$

also eine Fallgeschwindigkeit, welche die beobachtete von 0,91 um nicht weniger als das $\frac{1{,}347}{0{,}91} = 1{,}48$fache übertrifft. Es beweist dies also, dass die Fallgeschwindigkeit nicht im einfachen Verhältniss zu der Flächenentwicklung des Organs steht, sondern ganz auffallend verzögert ist. Dieses Resultat würde sich wahrscheinlich noch etwas steigern, wenn für 3 sein wirklicher Werth, welcher um einen kleinen Bruchtheil unter 1 herabsinken dürfte, eingefügt werden könnte.

Früchte, an welchen das Stielchen noch sitzt, funktioniren ebenso, aber ihre Fallzeit ist etwas kürzer. Sie stellen sich meist steiler ein, wobei die Stielseite vorausgeht und beschreiben eine engere und steilere Spirale. Der Unterschied zwischen der Fallzeit der einzelnen Organe ist, auch wenn sie sofort in typische Rotation übergehen, sehr bedeutend. Beispielsweise wurden 6 m Fallraum von ganz normal entwickelten, stiellosen Organen in Zeiten, welche zwischen 6, 7 und 8 Sek. schwankten, durchfallen, wobei die längste Fallzeit mit der längsten Bahn zusammenfiel.

Alle hierher gehörenden natürlichen Organe haben ziemlich unregelmässige Gestalt ihrer Flügel, ferner sind sie in der Regel, mindestens am Rande, ein wenig in der Fläche gekrümmt. Nachdem es nun wünschenswerth war, auch Versuche mit Körpern zu machen, welche dem reinen Typus

möglichst vollkommen entsprechen, so stellte ich solche aus gutem Schreibpapier her. Dieselben bestanden aus möglichst genau gemessenen und ausgeschnittenen, länglich rechteckigen Stücken von 5 cm Länge und 1 cm Breite und wogen bei einem Flächeninhalte von 500 qmm im Durchschnitt 50,1 mgm. Die Abweichungen von diesem mittleren Gewicht waren äusserst gering und bewegten sich innerhalb einer Differenz von 0,5 mgm. Diese Modelle verhielten sich im Ganzen einander sehr ähnlich, gleichwohl liessen sich gewisse Unterschiede erkennen. Ich führe hier das Resultat der Versuche mit einem derselben, welches genau 50,1 mgm wog, an.*)

Es wurde eine grössere Zahl von Fallversuchen gemacht und diejenigen unter ihnen ausgewählt, bei welchen die Rotation in möglichst gleicher Fallhöhe begann. Dieselben stimmten sehr gut überein. Die angegebenen Zahlen entsprechen Versuchen, welche grösste Werthe ergaben. Das Modell bewegte sich, aus längs horizontaler, quer steil geneigter Stellung fallen gelassen, in einer anfangs sehr weiten, dann sich verengenden Schraubenlinie, welche nach etwa $1^1/_2$ m Fallhöhe in eine nahezu gleichförmige Zylinderschraubenbahn von c. 60 cm Radius überging, wobei es seine Längsaxe aus ursprünglich horizontaler Stellung allmählich in einem Winkel von etwa 20—25° zur Horizontalen einstellte. Die Fallhöhe von 6 m wurde in 8,1 Sek. durchfallen, hievon

die ersten 3 m in 4,2 Sek.
„ letzten „ „ „ 3,9 „ also 1 m in 1,3 Sek.

Es entspricht dies 0,77 m pro Sekunde. Die grösste Fallgeschwindigkeit oder wenigstens eine ihr ausserordentlich nahekommende war damit ganz zweifellos erreicht, wie aus dem

*) Es wurden im ganzen 7 genau gleich grosse Modelle aus demselben Papierbogen hergestellt. Trotz des so nahe überein stimmenden Gewichtes stimmten die Versuchsergebnisse doch nicht ganz, wenigstens genügten die geringen Gewichtsunterschiede nicht zur Erklärung der Abweichungen in der Fallgeschwindigkeit. Es würde zuweit führen, auf alle Einzelheiten dieser Versuche einzugehen, ich will einstweilen nur bemerken, was aus der „Mechanik" der Bewegung erhellen wird, dass der Grund der Ungleichheit in kaum nachweisbaren Assymetrien der Modelle beruht, welche ungleiche Schiefstellung der Längsaxe zur Horizontalen und dadurch ungleiche Grösse der Horizontalprojektion der Widerstandsfläche bedingen.

Charakter der Bahn hervorgeht. Vergleichen wir hiermit die grösste Fallgeschwindigkeit, welche dasselbe Papiermodell besitzen würde, wenn es in horizontaler Flächenstellung senkrecht abwärts fiele, so ergibt sich diese aus den oben angegebenen Mass- und Gewichtszahlen. Wenn wir ausserdem den Coeffizienten 3 zu $\frac{4}{3} = 1{,}33$, entsprechend der ebenen Widerstandsfläche in die Gleichung einfügen, so erhalten wir

$$v = \sqrt{\frac{19620 \cdot 50{,}1}{0{,}001293 \cdot 500 \cdot 1{,}33}}$$

$$v = 1{,}067 \text{ m}$$

Die berechnete Fallgeschwindigkeit des Modells bei günstigster (horizontaler) Flächenstellung entspricht also dem $\frac{1{,}067}{0{,}77}$ $= 1{,}385$ fachen der wirklichen Fallgeschwindigkeit bei der beschleunigten senkrechten Rotation. Es wird hier demnach fast das 1,4 fache an Ausnützung des Luftwiderstandes geleistet.

Ein zweites der geprüften 7 gleichgrossen und gleichschweren Modelle, welches die höchsten Zahlen ergab, durchfiel 6 m Fallhöhe in 8,6 Sek., hievon die ersten 3 m in 4,4 und die letzten 3 m in 4,2 Sek. Aus der letzteren Fallzeit berechnet sich pro Sekunde 0,714 cm Fallhöhe. Nachdem die theoretische Fallgeschwindigkeit die gleiche bleibt, wie oben, so verhält sich hier die letztere zu der beobachteten wie $\frac{1{,}067}{0{,}714} = \frac{1{,}494}{1}$, d. h. die berechnete Fallgeschwindigkeit übertrifft die beoachtete um fast das anderthalbfache. Der Winkel, welchen die Längsaxe dieses Modells mit der Horizontalen machte, betrug dabei c. $12-13^0$.

Samen von Bignonia unguis (Bignoniac.).

Dieselben stellen 8—10 mm breite und 32—37 mm lange, flache Organe dar, welche aus einer flach zusammengedrückten Nuss mit häutigem, nach 2 Seiten lang ausgezogenem etwas durchscheinendem Flügel bestehen. Letzterer ist ziemlich steif und besteht nur an den äussersten Enden aus einer Zellschicht.

Die meisten Exemplare funktioniren auf zweierlei Art, ohne dass sich aber hier, wie bei Ailanthus, eine als besonders vorwiegend herausgestellt hätte. Einzelne, deren Ränder etwas stärker nach einer Seite aufgebogen sind, fallen immer in horizontaler Flächenstellung mit Horizontaldrehung um die Vertikalaxe. Im Uebrigen hängt die Art der Funktion wesentlich von der zufälligen Fallstellung ab.

Unter 14 normal entwickelten Exemplaren fielen aus horizontaler Stellung 8 mit senkrechter Rotation um die horizontal gestellte Längsaxe und 6 in horizontaler Flächenstellung mit Rotation um die senkrecht gestellte Vertikalaxe. Die ersteren durchfielen 3 m Fallhöhe im Durchschnitt in 3,6 Sek., wobei die Fallzeit zwischen 3,4 und 4,4 Sek. schwankte. Die letzteren durchfielen 3 m im Durchschnitt in 3 Sek., und die Fallzeit schwankte dabei zwischen 2,4 und 3,6 Sek.

Ein genau geprüftes Organ von typischer Gestalt wog 22,6 mgm und mass 285 qmm Flächeninhalt. Die grösste Länge betrug 34 mm, die grösste Breite 10 mm. Dasselbe war der Länge nach in der Fläche etwas konkavkonvex gekrümmt, in der Querrichtung dagegen ziemlich eben. Es fiel je nach der anfänglichen Lage entweder in horizontaler Flächenstellung mit der Konvexität nach abwärts gerichtet und um seine Vertikalaxe mässig rasch rotirend oder um seine horizontal gestellte Längsaxe rotirend in der charakteristischen Bewegung des IX. Typus. Das Organ nahm sehr viel leichter die letztere Bewegungsform an, wie die erstere.

Horizontal drehend (aus schwach geneigter Fallstellung) durchfiel es 6 m Fallhöhe in 5,9 Sek. hievon den

1. m in 1,1 Sek.
2. „ „ 1,1 „
3. „ „ 1,0 „
4.—6. „ „ 2,7 „ , also 1 m in 0,9 Sek.

In einer Sekunde somit $\frac{0,9}{1} = 1,11$ m. Diese Geschwindigkeit kommt der grössten erreichbaren jedenfalls sehr nahe.

Vertikal drehend (aus steiler geneigter Fallstellung) durchfiel es 6 m in 6,6 Sek., hievon den

1. m in 1,4 Sek.
2. „ „ 1,2 „
3. „ „ 1,0 „
4.—6. „ „ 3,0 „

In 1 Sekunde somit einen Meter. Die grösste Fallgeschwindigkeit war damit erreicht. Die Bahn verlief in einer anfangs etwas weiteren Spirale von c. 70 cm Durchmesser, welche sich aber rasch verengerte und schon nach 2 m einem Durchmesser von c. 7—8 cm erreichte. Derselbe blieb von hier an gleich und die Längsaxe des Organes machte dabei einen Winkel von c. 38—40° mit der Horizontalen.

Die relative Leistungsfähigkeit der beiden Funktionsarten verhielt sich also trotz der sehr starken Schiefstellung der Längsaxe des Organes in Folge Unsymmetrie, bei der vertikalen Drehung wie 1 : 1,11 oder die Fallgeschwindigkeit bei der ersten Funktionsart war um 1,11 mal grösser als bei der letzteren.

Wenden wir den allgemeinen Massstab der theoretischen Fallgeschwindigkeit an, so erhalten wir aus den oben angeführten Grössen, wenn wir der konvexen Flächenkrümmung halber 3 annähernd gleich 1 setzen

$$v = \sqrt{\frac{19620 \cdot 22{,}6}{0{,}001293 \cdot 285}}$$

$$v = 1{,}097 \text{ m}$$

Bei horizontaler Drehung ist die Leistungsgrösse somit $\frac{1{,}097}{1{,}11} = 0{,}988$ und bei vertikaler $\frac{1{,}097}{1{,}0} = 1{,}097$. Die auffallend geringe Leistungsgrösse im letzteren Falle beruht nur auf der überaus starken Neigung, welche die horizontale Projektionsfläche während des Falles sehr verkleinert. Im ersteren ist sie nahezu gleich 1, also der theoretischen fast entsprechend.

Samen von Tecoma stans (Bignoniac.).

Die Organe sind im Allgemeinen ähnlich gestaltet wie die vorigen, nur etwas kleiner und der Flügel dünner (Fig. 9 Taf. II).

Unter 14 normal entwickelten Exemplaren drehten sich

aus horizontaler Fallstellung 4 um ihre horizontale Längsaxe und 10 um ihre senkrechte Vertikalaxe.

Die ersteren legten 3 m Fallraum im Mittel in 3,3 Sek. zurück, wobei die Fallzeit zwischen 2,8 und 4 Sek. schwankte. 6 m Fallraum durchmassen sie im Mittel in 6,5 Sek., wobei die Fallzeit zwischen 6,2 und 7 Sek. schwankte. Die mittlere grösste Fallgeschwindigkeit betrug also 3,2 Sek. auf die letzten 3 m, was 1,06 Sek. auf den Meter entspricht.

Die 10 horizontal drehenden Samen gebrauchten auf 3 m 2,8 Sek., wobei die Fallzeit zwischen 2,6 und 3 Sek. schwankte. Auf 6 m Fallraum gebrauchten 8 von ihnen (2 waren verloren gegangen) im Mittel 5,4 Sek. und die Fallzeit schwankte zwischen 4,8 und 6,2 Sek. Die mittlere Geschwindigkeit betrug also für die letzten 3 m 2,6 Sek. und für 1 m 0,86 Sek. Diese kommt jedenfalls der grössten mittleren Geschwindigkeit der Organe sehr nahe.

Ein genau geprüftes Exemplar wog 13 mgm und hatte 132 qmm Flächeninhalt. Die grösste Länge betrug 24,5 mm, die grösste Breite 7 mm. In der Quere war die Fläche etwas konkavkonvex gekrümmt, die verschmälerten Enden des Flügels waren in Folge ihrer grossen Zartheit elastisch-biegsam. Aus horizontaler oder schwach geneigter Stellung fiel das Organ in horizontaler Flächenstellung mit sehr langsamer horizontaler Drehung um seine Vertikalaxe geradlinig abwärts. Aus quer steil geneigter Stellung drehte es sich um seine horizontal gestellte Längsaxe. Beide Bewegungsformen wurden ziemlich gleich leicht angenommen.

Horizontal drehend wurden (aus horizontaler Fallstellung) 6 m Fallhöhe in 4,1 Sek. durchfallen, wovon der

1. m in 1,0 Sek.
2. „ „ 0,8 „
3. „ „ 0,6 „
4.—6. „ „ 1,7 „ , also 1 m in 0,56 Sek.

In einer Sekunde somit $\frac{1}{0,56} = 1,765$ m, was der grössten erreichbaren Geschwindigkeit jedenfalls sehr nahe kommt.

Vertikal drehend (aus steil geneigter Fallstellung) wurden 6 m in 6 Sek. durchfallen, wovon der

1. m in 1,27 Sek.
2. „ „ 1,13 „
3. „ „ 0,9 „
4.—6. „ „ 2,7 „ , also 1 m in 0,9 Sek.

Dies macht in 1 Sek. $\frac{1}{0{,}9} = 1{,}111$ m. Die grösste Fallgeschwindigkeit war damit erreicht. Die Bahn stellte eine oben weite Spirale von etwa 70 cm Durchmesser dar. Letzterer blieb vom 3. m angefangen dauernd etwa 15 cm gross. Dabei stellte sich die Längsaxe des Organs in einen Winkel von etwa $20—22^0$ zur horizontalen.

Die relative Leistungsfähigkeit der beiden Funktionsarten verhielt sich also wie 1,111 : 1,765 oder die Fallgeschwindigkeit bei der ersteren war 1,58 mal grösser wie bei der letzteren.

Theoretisch erhalten wir, wenn wir 3 annäherungsweise = 1 setzen

$$v = \sqrt{\frac{19620 \cdot 13}{0{,}001293 \cdot 132}}$$

$$v = 1{,}22 \text{ m}$$

somit verhält sich die theoretische Fallgeschwindigkeit zur beobachteten bei der ersteren Funktionsart wie $\frac{1{,}222}{1{,}765} = \frac{0{,}691}{1}$ und zur zweiten wie $\frac{1{,}222}{1{,}111} = \frac{1{,}099}{1}$. Im ersteren Falle haben wir also eine ganz auffallend geringe Leistungsgrösse, welche sich nur durch die hohe elastische Biegsamkeit der beiden Flügelenden erklärt. Im letzteren ist sie ebenfalls sehr gering. Im Verhältniss zur ersteren aber leistet sie dennoch bedeutendes wie aus der oben angeführten Verhältnisszahl hervorgeht.

Sehr eigenthümlich verhielt sich ein sonst ganz normal aussehendes Exemplar. Dasselbe gebrauchte für 6 m Fallhöhe nicht weniger als 11,6 Sek. Dasselbe funktionirte normal um die horizontale Längsaxe drehend, aber intermittirend. Es beschrieb abwechselnd kurze Stücke von einander gegensinnig verlaufenden Spiralen, wobei es sich zwischen je zwei Stücken immer überschlug. Eine genauere Untersuchung über die Gründe dieses eigenthümlichen Verhaltens habe ich

nicht angestellt, doch schien es mir, als ob neben etwas stärkerer Verschiebung des Schwerpunktes in der Längsrichtung stärkeres Federn des einen Flügelendes die Ursache abgeben dürfte.

In der Regel beschreiben die Organe bei der typischen Funktion ziemlich enge Spiralbahnen. In einem Fall beschrieb ein Exemplar, welches 4 Sek. auf 3 m Fallraum gebrauchte, in der Horizontalprojektion eine fast geradlinige Bahn von 2,50 m Länge.

Samen von Entada (Papilionac.).

Diese merkwürdigen Organe sind dadurch geflügelt, dass das sich ablösende Endokarp der Hülse besondere Fächer um jeden Samen bildet, welche sich einzeln vom aufspringenden Epikarp lösen. Diese Fächer springen nicht auf und umschliessen als eine nach zwei Richtungen in dünne Flügel von leichtem lockerem Gewebe ausgezogene Hülle den Samen. Die Mitte der Organe, welche den Samen enthält, ist linsenförmig bikonvex gewölbt. (Vgl. Fig. 7 Taf. II). Ein solcher normal entwickelter Samen von Entada abyssinica hatte annähernd länglich rechteckige Gestalt und mass 42 mm Länge auf 11 mm Breite, der Flügelrand war $^1/_2$ mm dick, und an beiden Enden etwas aufgebogen.

Die Funktion ging auf beide Arten vor sich, doch leichter in horizontaler Rotation um die Vertikalaxe. Die Fallzeit für 3 m Höhe betrug in letzterem Falle 1,6 Sek., bei Rotation um die horizontal gestellte Längsaxe 1,7 Sek. Dabei wurde aber nur das letzte Drittel des Fallraums in senkrechter Rotation durchfallen.

Die weit grösseren Flügelflächen der Samen von E. polystachya DC. ergaben in 3 sehr gleich gestalteten Exemplaren, welche im Durchschnitt 72 mm Länge auf 16 mm Breite besassen, ähnliche Resultate, doch etwas grössere Unterschiede zwischen den beiden Funktionsarten. Bei Rotation um die Längsaxe wurden 3 m Höhe in freilich auch erst nach $^1/_3$—$^1/_2$ Fallraum eintretender Rotation, und zwar in 1,9 Sek. durchfallen. Bei andauernder Horizontalrotation um die Vertikalaxe in 1,6 Sek.

Bei höheren Fallräumen würden die Unterschiede zwischen den beiden Funktionsarten natürlich grösser ausfallen.

Leistungsgrösse des Typus.

Zwei von den sorgfältig berechneten Beispielen, das eine von einem natürlichen Flugorgane, das zweite von einem Modell, gestatten Vergleich mit den Leistungsgrössen anderer Typen. Was zunächst die berechnete Ailanthusfrucht betrifft, so ergab die Beobachtung 0,91 m für die Sek., wogegen die Berechnung für $3 = 1$ 1,347 m ergibt. Wir haben hier also eine Leistungsgrösse von $\frac{1347}{910} = 1{,}48$. Bei dem zweiten berechneten Papiermodell war beobachtet worden 0,714 m, die Berechnung für $3 = 1$ ergibt 1,233 m, also ist die Leistungsgrösse $\frac{1233}{714} = 1{,}72$. Unter allen bisherigen, in der Bewegungsrichtung drehenden 3 Typen, dem V., VIII. und IX. steigt also im letzten die Leistungsgrösse am höchsten an. Letztere überschreitet sogar hier in dem berechneten Modell die Leistung der nur theoretisch als möglich angenommenen, überaus günstigen, konkav halbkugelschaligen Widerstandsfläche.

Es gilt dies für die natürlichen Flugorgane des IX. Typus und für Modelle, wie sie den mir bekannt gewordenen natürlichen Körpern mehr oder weniger nahekommen. Ausserdem stützt es sich auf erlangte Mittelwerthe. Bei den Modellen stützt es sich speziell auf solche, bei denen der Unterschied zwischen Länge und Breite bei gleichem Flächeninhalt nicht mehr wächst.

Die mir bekannten natürlichen Organe des Typus besitzen im Durchschnitt ein Verhältniss von Länge und Breite, welches sich zumeist demjenigen von 4 : 1 oder noch eher 7 : 2 nähert. Manche Formen sind verhältnissmässig noch kürzer, andere nähern sich dem Verhältniss 5 : 1. Noch längere sind mir nicht bekannt geworden.

Thatsächlich kann nun die Leistungsfähigkeit weit unterhalb der angegebenen Grösse bleiben, andererseits sich aber auch sehr bedeutend darüber erheben. Modelle von den glei-

chen Verhältnissen wie das genannte können so nach vielen Versuchen Leistungsgrössen zeigen, welche zwischen 1,2 und 2,0 schwanken. Sinkt der Unterschied zwischen Länge und Breite bei gleichem Flächeninhalt unter das Verhältniss $\frac{5}{1}$ so macht sich eine deutliche Abnahme der höchsten Leistungsfähigkeit bemerklich, andererseits verengern sich aber auch die Grenzen der Schwankungen immer mehr, so dass bei dem Verhältniss $\frac{2}{1}$ die Leistungsgrösse sehr gleichmässig wird.

Solche enorme Leistungsgrössen wie 2,0 ergeben sich namentlich dann, wenn man die verschiedenen Stücke der theoretisch immer mehr einer geraden sich nähernden und in Folge dessen vertikal immer langsamer werdenden, gekrümmten Bahn besonders berechnet. Das theoretische Verhalten trifft nämlich für die ganzen Bahnen thatsächlich nicht leicht zu, da die Körper bei weiterem Fallverlauf ihre Längsaxe schief zur Horizontalen stellen und in Folge dessen rascher fallen, als anfangs. Aus höheren Gesammtbahnen von 6 m berechnet, stieg die Leistungsfähigkeit derartiger Modelle, wenn nicht bei gleichbleibendem Dimensionsverhältniss die Fläche sich vergrössert oder das Gewicht verringert, nach meinen Fallversuchen nicht über 1,9 und aus den untern Stücken der Bahn berechnet, nicht über 1,86.

Wächst der Unterschied zwischen Länge und Breite bei gleichbleibendem Flächeninhalt noch weiter, so steigt auch die Leistungsgrösse noch etwas und namentlich bleibt sie auch in den unteren Teilen der Bahn auf grösserer Höhe, indem die Längsaxe der Organe sich dauernd in mehr horizontaler Lage erhält. Die Leistungsgrösse kann dann noch über 2,0 ansteigen und erhält sich während der ganzen Bahn annähernd gleich.

Diese hohe Leistung tritt ein bei den Dimensionsverhältnissen, welche zwischen $\frac{6}{1}$ und $\frac{9}{1}$ liegen. Sie ist innerhalb der angegebenen Grenzen nahezu gleich. Von $\frac{9}{1}$ an-

gefangen, z. B. bei $\frac{10}{1}$ sinkt sie bereits wieder herab. Das Verhältniss $\frac{5}{1}$ bleibt zwar hinter diesen höchsten Leistungen zurück, und noch etwas mehr thun dies die Verhältnisse $\frac{4}{1}$ und $\frac{3}{1}$, immerhin aber nähert sich wenigstens das erstere sehr der höchsten Leistungsfähigkeit für einen bestimmten Flächeninhalt.

Genaueres über dieses Verhalten, sowie über dessen Gründe, wird im nächsten Abschnitt zur Sprache kommen. Bei Modellen vom angegebenen Flächeninhalt (500 qmm) verhält sich die Sache gerade oder vielmehr fast gerade so, wie bei den in der Tabelle V a und b benützten Modellen von 800 qmm.

Nur ist die Leistungsgrösse bei den ersteren, entsprechend ihrer im Verhältniss etwas grösseren Zahl von weniger wirksamen Randflächenelementen um einen sehr kleinen Bruchtheil geringer.

Im übrigen kann die Leistungsgrösse bei dieser Bewegungsform in Wirklichkeit noch bedeutend über 2,0 ansteigen.

Unter besonders günstigen Umständen kann sie nach einigen orientirenden Versuchen sogar bis zu einer Höhe von 2,6—2,7 wachsen und damit wohl überhaupt die grösste mögliche Ausnützung des Luftwiderstandes durch einen frei fallenden Körper darstellen. Sie übertrifft dann noch um etwas die Leistungsgrössen der Organe des X. und XII. Typus, welche unter den natürlichen pflanzlichen Flugkörpern (abgesehen von staub- und haarförmigen) die höchsten darstellen. Wo die oberste Grenze dieser Leistungsfähigkeit liegt, habe ich, als zu weit von meinem eigentlichen Gegenstand abführend, nicht näher untersucht. Ob bei den natürlichen Flugorganen des IX. Typus aber überhaupt Leistungsgrössen der Gesammtbahn oder gar der unteren Bahnstücke vorkommen, welche die Grösse 2,0 erreichen, ist bei der geringen Symmetrie und Homogenität derselben zum mindesten sehr unwahrscheinlich.

Krümmungen bedeuten im Allgemeinen Flächenverlust, indem wesentlich nur die grösste Horizontalprojektion ausschlaggebend ist.

Bei Ailanthus scheint die Krümmung des Organes ungünstig für die Ausnützung der Fläche, andererseits dürfte dieselbe vielleicht relativ nützlich sein zur Verminderung der Assymetrie, sowie zur Beförderung der Rotation um die Längsaxe. Bei dem berechneten Exemplar betrug die Fläche der ganzen Frucht, wenn dieselbe durch schwachen Druck unter einer dünnen Glasplatte ausgebreitet wurde, 220,7 qmm, wogegen die grösste Projektionsfläche im Zustande der natürlichen Krümmung nur 188,2 qmm betrug. Somit sind nicht weniger wie 32,5 qmm Fläche resp. das betr. Material gewissermassen verschwendet. Diese Bildung muss im Grunde sogar, wegen der Vermehrung des Gewichtes des ganzen Organes, schädlich wirken. Indessen verlangt diese, von mir nicht weiter geprüfte Frage, wie so manche andere bei vorliegenden Studien sich aufdrängende, eine spezielle Prüfung.

Zur Mechanik der Bewegung.

Stellt man sich Modelle der hierhergehörigen Flugorgane her, indem man den Flügel aus schwächerem, die Nuss aus stärkerem Papier oder Karton, oder auch aus Siegellack verfertigt, so funktioniren dieselben genau so, wie die natürlichen Objekte. Aber auch ohne genaue Nachbildung funktioniren im Umriss ähnlich geschnittene, sowie überhaupt längliche Papierstückchen oder dünne längliche Platten aus beliebigem Material ganz gleich. Gibt man den Modellen schwache Krümmungen in der Quer- oder Längsrichtung oder in beiden, so dass schwach konvexe Flächen hergestellt werden, so treten beide Formen der Bewegung auf. Macht man sie aber ganz eben, so zeigen sie, so lange sie nicht zu schmal werden, ausschliesslich die für den IX. Typus charakteristische Rotation um die Längsaxe.

Die Annahme stabil horizontaler Stellung und die sehr häufig damit verbundene horizontale Rotation um die vertikale Schwerpunktsaxe schliesst sich engstens an das Verhalten der konvex scheibenförmigen Organe an. Die Rota-

tion wird durch schiefe Flächenstellung der beiderseitigen Flügelenden erzeugt. Es entstehen dadurch horizontal wirkende Kraftkomponenten, welche, wenn ihre statischen Momente sich nicht gegenseitig aufheben, horizontale Drehungen um die vertikale Schwerpunktsaxe verursachen. Der Luftwiderstand gegen diese Drehungen ist relativ gering, in Folge dessen können sie eine gewisse Geschwindigkeit erlangen und erhöhen so in geringem Grade die Stabilität der horizontalen Lage.

Die Fallbahn verläuft typisch senkrecht. Bei schwachen Verschiebungen des Schwerpunktes in der Querrichtung, also gegen eine lange Kante, kommen steil geneigte, schraubige Bahnen zu Stande. Dieses Verhalten, wie es nicht selten vorkommt, z. B. bei den zweiflügeligen behüllten Samen von Entada und manchen Bignoniaceensamen, schliesst sich dann als Zwischentypus an dasjenige des X. Typus der „länglichen Platte mit belasteter Längskante" an.

Es berührt uns diese sehr einfache Bewegung, respektive Rotation, welche keinen Einfluss auf die Grösse der senkrechten Geschwindigkeit ausübt, hier nicht weiter, dagegen müssen wir der anderen Funktion, wie sie die ganz flachen Organe ausschliesslich zeigen, eine eingehendere Betrachtung widmen. Ich werde zuerst die Einstellung besprechen, dann die Rotation um die Längsaxe mit der durch sie erzeugten, in der Vertikalprojektion gekrümmten Bahn berücksichtigen, und zum Schluss auf die seitlichen Abweichungen von der, in Horizontalprojektion typisch (theoretisch) geradlinigen Bewegung eingehen.

a. Die Einstellung.

Die mechanischen Gründe der horizontalen Einstellung der ebenflächigen Organe fallen, soweit sie die sofortige Einnahme horizontaler Lage der Längsaxe durch Drehungen um eine, im Raum horizontale Queraxe anlangen, mit denjenigen bei den haarförmigen Flugorganen zusammen. Naturgemäss wächst die Stabilität des Gleichgewichtes in Bezug auf die im Raume horizontale Queraxe und damit die Stabilität der längs horizontalen Lage mit der Zunahme der Längendimension. In Bezug auf ihre Längsaxe besitzen die

Organe dagegen keine stabile Gleichgewichtslage, sondern beginnen sofort Schwankungen um sie auszuführen, welche sich steigern. Sobald diese einen gewissen Winkelausschlag gegen die Horizontale überschreiten, was hier sehr rasch geschieht, ist die Einstellung gegeben und es beginnt nun gerade so, wie bei den flach scheibenförmigen Organen der V. Gruppe die Rotation.

Ein besonderes Verhalten zeigte, wie aus der bereits gegebenen Schilderung des Verlaufes erhellt, die Einstellung der eigenthümlich gekrümmten Ailanthus-Früchte. Dessen Gründe kann man an den Organen selbst oder auch an vergrösserten Papiermodellen, welchen man dieselbe Krümmung gegeben hat, erkennen, wenn man dieselben aus ganz geringen Fallhöhen mit kleinen Zwischenräumen von 1—3 cm auf eine Unterlage von feinem Sand auffallen lässt.

Beim Fall aus senkrechter (naturgemässer) Stellung mit dem Stielende nach oben gerichtet (Fig. 1 Taf. V) trifft der aufsteigende Luftwiderstand gleichzeitig Stücke der beiden Schraubenflächen der untern Flügelhälfte. Die beiderseitigen Drücke erzeugen gleichsinnige horizontale Komponenten und damit eine Drehung um die Längsaxe. Die senkrecht nach aufwärts gerichteten Komponenten verzögern den Fall. Gleichzeitig aber entsteht dadurch, dass die eine (hintere) Fläche eine weitaus grössere schiefe Area dem Luftwiderstande darbietet, als die andere (vordere) eine Drehwirkung um eine, im Raum horizontale Schwerpunktsaxe des Organes. Diese wird noch unterstützt durch den Druck, welchen die längs der Vorderfläche aufsteigende Luft (in der Figur durch den oberen Pfeil dargestellt) mit ihrer horizontalen Druckkomponente am oberen Flügelende gleichsinnig ausübt. Die beiden Drehungen kombiniren sich zu der resultirenden Bewegung, wie sie bereits beschrieben wurde und so gelangt das Organ in horizontale Flächenlage. In dieser erzeugt der, die (früher vordere) nunmehr untere Schraubenfläche treffende Luftwiderstand ebenfalls wieder eine Drehwirkung und zwar diesmal um die im Raume senkrecht gestellte Vertikalaxe des Organes. Ebenso wirkt manchmal das obere (Stiel-) Ende des Flügels, indem wenigstens sein Rand quer etwas aufwärts gekrümmt ist und zwar hie und da auf der,

der wirksamen Schraubenfläche gegenüberliegenden Seite. In letzterem Falle ist eine zweite Angriffsfläche für horizontale Drehkräfte vorhanden und die erzeugten beiden Drehwirkungen sind gleichsinnig.

In manchen Fällen beschleunigt sich diese einmal eingeleitete Drehung um die nun im Raum senkrechte Vertikalaxe des Organs ziemlich bedeutend und dauert dann an, indem sie der quer horizontalen Flächenlage hinreichende Stabilität verleiht. In den meisten Fällen ist aber die letztgeschilderte quere Flächenkrümmung des Stielendes derjenigen der Schraubenfläche der andern Flügelhälfte antagonistisch oder sie ist öfter auch gar nicht ausgebildet, ausserdem ist der Luftwiderstand, welcher sich der horizontalen Rotation entgegensetzt, namentlich, wenn die schraubige Krümmung (wie in der Mehrzahl der Fälle) stark entwickelt ist, sehr bedeutend. Es kann somit nicht zu beschleunigter Horizontalrotation kommen und nun wirkt die Resultirende des Luftwiderstandes auf die ihm entgegen geneigten Flächentheile als eine in senkrechter Ebene um die horizontale Längsaxe drehende Kraft. Einmal begonnen, wird diese Drehung immer mehr beschleunigt und damit ist nun die charakteristische Bewegungsart der Organe eingeleitet.

Wenn man die Früchte, oder noch besser vergrösserte leichte Papiermodelle in die Lage bringt, aus der sie in diese senkrechte Drehung gelangen, und lässt sie so fallen, am besten, indem man sie von einer langsam sich neigenden glatten Unterlage in horizontaler Stellung ihrer Längsaxe abgleiten lässt, so kann man ganz gut die Wirkung der einzelnen Flächentheile beobachten. Den Ausschlag, nach welcher Richtung die senkrechte Drehung stattfindet, gibt die schraubig gedrehte Flügelhälfte. Denn wenn man die schraubige Krümmung vermindert, so findet die Drehung in umgekehrter Richtung statt und zwar in gleicher wie bei einem ganz ebenflächigen Modell. Die Gründe hiefür beruhen darauf, dass die mehr oder weniger starke Schraubenkrümmung durch entsprechend stärkere oder geringere Neigung eines Theiles der wirksamen Fläche den Angriffspunkt der Resultirenden des Luftwiderstandes vor oder hinter resp. über oder unter die Längsaxe des Organes verschiebt. Die

Drehung selbst findet bei Ailanthus unter genau den gleichen Bedingungen und Erscheinungen statt, wie bei den ganz ebenflächigen Organen.

b. Die Vertikalrotation.

α. Allgemeines über die Gründe des Vorgangs und seiner Wirkungen.

Die Drehung beginnt sofort, wenn man die geschilderten flachen Modelle in horizontaler Lage der Längsaxe mit steil geneigter oder auch senkrecht gestellter Queraxe fallen lässt. Die Bewegung geht so vor sich, dass die nach abwärts geneigte, beim Fallenlassen vorausschreitende Längskante rasch nach aufwärts gedreht wird und dass in Folge davon immer beschleunigtere halbe Umdrehungen um die Längsaxe stattfinden. Ist das Modell homogen und genau symmetrisch, liegt also der Schwerpunkt in der geometrischen Mitte, so bewegt sich dasselbe nun in einer schief zur Erde geneigten, horizontal projizirt geradlinigen Bahn in der Richtung der Horizontalprojektion seiner Queraxe, und zwar nach der Seite seiner aufwärts drehenden Kante. Die Vertikalprojektion der Bahn dagegen zeigt eine besonders anfangs stärker gekrümmte, nach oben konkave Kurve, welche aber sehr schnell in eine, immer mehr einer Geraden sich nähernde Linie übergeht. Bei schmäleren, relativ stark verlängerten Modellen, welche rasch rotiren, macht die Bahn den Eindruck einer einheitlichen Kurve, bei grösseren Modellen jedoch scheint es anfangs, als ob sie aus vielen kleinen sekundären Kurven zusammengesetzt sei. Immerhin geht die Drehung und Bewegung auch bei den letzteren so rasch vor sich, dass es nicht möglich ist, sie ohne besondere Hülfsmittel genau zu verfolgen.

Der Vorgang entspricht dem Anschein nach demjenigen, welchen wir bei der Drehbewegung der flach scheibenförmigen Organe sahen. Dort ist nur die Drehung relativ wenig beschleunigt und man kann, wenigstens im Anfang der Bewegung, bei Verwendung grösserer, sehr leichter Papierscheiben als Modelle, ganz deutlich erkennen, dass jeder halben Umdrehung der Scheibe eine stärkere Krümmung der beschriebenen Bahnlinie entspricht. Die Bahnlinie des

Schwerpunktes der Organe stellt dort also eine deutliche Wellenlinie dar. Mit zunehmender Drehungsgeschwindigkeit werden die Wellen flacher und undeutlicher.

Es lag mir nun zunächst daran, sicher festzustellen, ob diese Wellenbewegung der Bahn des Schwerpunktes auch noch vorhanden ist, wo man sie mit dem freien Auge überhaupt nicht mehr zu erkennen vermag.

Um die sekundären Kurven daher möglichst sichtbar zu machen, befestigte ich an den beiden Enden der medianen Längsaxe eines grossen Modells zu dessen Fläche senkrechte kleine runde Scheiben von lebhaft rother Farbe. Das Modell selbst bestand aus einem Blatt starken Schreibpapiers von 16½ cm Länge und 8 cm Breite, welches zur besseren Versteifung in der Mitte mit einem 1 cm breiten Längsstreifen stärkeren Papiers beklebt war. Die rothen Scheiben an den Enden der Längsaxe massen 3 cm im Durchmesser. Ausserdem spannte ich mittelst eines Bindfadens einen 3 cm breiten Papierstreifen aus einer Höhe von etwa 2 m in flacher Kurve schief zum Boden herab und zwar in der Richtung, und mit der annähernden Krümmung, in welcher nach einer Reihe von Vorversuchen die Bahn des Modells eine Strecke weit verlief, wenn es von entsprechender Höhe und unter einem bestimmten Neigungswinkel seiner Queraxe fallen gelassen wurde. In dieser Höhe, 10 cm von dem Papierstreif entfernt, war ein kleines Brettchen angebracht, welches mittelst eines Scharniers an der Wand befestigt war und welches mittelst eines, durch einen darüber befindlichen Ring gezogenen langen Bindfadens horizontal gestellt bis beliebig schief geneigt werden konnte. Ich legte nun das Modell so auf das horizontalgestellte, etwas schmälere glatte Ende des Brettchens, dass die beiden seitlichen Scheibchen darüber hervorragten, und dass der vordere Längsrand des Modells genau auf den Vorderrand des Brettchens traf. Wenn ich dann durch allmähliges Nachlassen des Bindfadens das Brettchen langsam in immer geneigtere Lage brachte, so glitt schliesslich bei 30° Neigung das Modell herab und bewegte sich unter Aufwärtsdrehung seines jeweiligen Vorderrandes um seine, in horizontaler Stellung verharrende Längsaxe, und zwar verlief die Bahn ein grosses Stück dicht an dem

aufgespannten Papierstreifen entlang. Anfangs fiel die Richtung nicht ganz mit demselben zusammen und zum Schluss auch nicht mehr ganz, aber eine Strecke von etwa anderthalb Metern bewegte sie sich genau in gleicher Linie. Stellte ich mich nun in richtiger Entfernung so auf, dass das Modell hinter dem Papierstreif sich bewegte, so konnte ich deutlich erkennen, ob die rothe Scheibe eine einfache oder mehrfach gekrümmte Kurve beschrieb, weil dieselbe im letzteren Falle bald ober- bald unterhalb des Papierstreifs sichtbar werden musste.

Es zeigte sich bei diesem Versuch in der That, dass die Scheibe auch bei rascher Rotation des Modells eine deutlich wellenförmige Bahn während der Bewegung beschreibt, und dass die Wellen mit bestimmten Abschnitten je einer Umdrehung zusammenfallen. Eine exakte Aufnahme der Wellenlinie war mit den mir zu Gebote stehenden Hülfsmitteln zwar nicht möglich, doch lässt sich der mechanische Vorgang bei der Entstehung derselben auch ohne dies verstehen, wenn man den Gang der Bewegung Schritt für Schritt an möglichst langsam rotirenden, grossen und leichten isodiametrischen Papierblättern verfolgt.

Lässt man die Modelle in quer senkrechter Stellung fallen, so fallen sie anfangs ein längeres Stück und steiler, wie aus geneigter Stellung hinab, (in der Richtung ss_1 der Fig. 2 Taf. V), drehen sich aber ebenso und machen dann dieselbe Bahn mit nur anfangs etwas stärker nach unten ausgebauchter Krümmung.

Am raschesten gehen sie in Rotation über und beschreiben in ihrer Gesammtrichtung eine, in Vertikalprojektion von Anfang an am meisten sich einer Geraden nähernde Bahn, wenn man sie, wie bei dem oben beschriebenen Versuch geschehen, aus 30^0 Neigung von einer ebenen glatten Unterlage abgleiten lässt. Lässt man sie in geneigter Stellung einfach fallen, so ist eine bedeutend steilere Neigung von mindestens 55^0—65^0 mit der Horizontalen die günstigste für sofortigen Beginn der Drehung. Aus zu wenig geneigter Lage dagegen rotiren sie schwierig oder gar nicht mehr und fallen nach einer viertels bis nahezu halben Umdrehung mit der entgegengesetzten Neigung herab, worauf Drehung

und Bewegung in umgekehrter Richtung stattfindet. 35° Neigung genügt bei senkrechtem Fallenlassen nicht mehr. Es geht daraus hervor, dass zur Einleitung der Bewegung ein gewisses Minimum lebendiger Kraft nöthig ist, sonst überwinden die Widerstände, welche sich der Drehung entgegensetzen, diese und die Drehung kommt nicht bis zur Hälfte zu Stande.

Vergegenwärtigen wir uns den Vorgang nunmehr im Einzelnen.

Wenn eine vertikale zylindrische Scheibe, welche um eine leicht zu entfernende, feste horizontale Axe rotiren kann, mittelst eines am Umfange aufgewickelten Fadens mit einer Kraft, welche dem Gewicht der Scheibe gleich ist, vertikal aufwärts gezogen wird und man entfernt die feste Axe, so fällt die Scheibe nicht herab, sondern erhält sich unter Rotation frei schwebend. Die beiden wirksamen Kräfte, die Schwerkraft, welche im Schwerpunkt angreift und die aufwärts drehende Kraft, welche am Scheibenumfang angreift, bilden ein Kräftepaar, welches keine fortschreitende, sondern nur eine Drehbewegung hervorbringt. Der nach aufwärts wirkende Zug wirkt also gerade so, als ob er nicht nur eine Drehbewegung erzeugen würde, sondern als griffe er auch noch mit seiner vollen Kraft direkt im Schwerpunkt an. Es entspricht dies dem mechanischen Lehrsatze, dass der Schwerpunkt eines materiellen Punktensystems sich bewegt, wie wenn die Massen aller einzelnen materiellen Punkte und die Angriffspunkte aller einzelnen Kräfte in ihm vereinigt wären.

Wenden wir dieses mechanische Prinzip auf die aus quer senkrechter oder quer steil geneigter Lage frei fallende längliche Platte an, so ergibt sich folgendes:

Die Schwere sucht den Körper senkrecht nach abwärts zu ziehen. Der Luftwiderstand wirkt ihr entgegen, greift aber, entsprechend der Grösse des Neigungswinkels, mehr oder weniger entfernt von dem Schwerpunkt (resp. von der Schwerpunktslängsaxe) an und bildet so mit der Schwerkraft ein drehendes Kräftepaar.

Es greift die nach aufwärts gerichtete Kraft des Luftwiderstandes, bei geneigter Stellung der Platte natürlich nur deren senkrechte Komponente, wo immer sie

auch sonst angreifen möge, mit ihrer vollen Grösse gleichzeitig im Schwerpunkte an, und verzögert dem entsprechend den Fall. Genau so wirkt die bei geneigter Stellung erzeugte horizontale Komponente, indem dieselbe ebenfalls gleichzeitig im Schwerpunkte angreift und entsprechende horizontale Geschwindigkeit erzeugt. Ausserdem aber wirkt die Kraft, je nach der Entfernung ihres Angriffspunktes vom Schwerpunkt auch noch drehend, und zwar mit dem Produkt aus der algebraischen Summe der sämmtlichen wirksamen Drücke in die Grösse des wirksamen Hebelarmes.

In senkrechter Fallstellung muss sich eine symmetrische ebene Platte mit medianem Schwerpunkt, wie wir bereits in dem Kapitel über den Angriffspunkt des Luftwiderstandes gesehen haben, in labilem Gleichgewicht befinden. Die allermindeste Schiefstellung erzeugt drehende Kräfte. Solche Schiefstellungen zur Richtung des Luftwiderstandes müssen aber nothwendigerweise eintreten. Damit beginnt dann die Drehung. Bei ganz ebenen Platten findet sie gleich leicht nach beiden Richtungen statt. Ist die Platte in der Querrichtung leicht gekrümmt, so ist bei quer senkrechter Stellung von selbst schon ein Angriffspunkt auf der konvexen Seite der unteren Hälfte derselben gegeben und hiezu gesellt sich noch ein zweiter, indem auch auf der konkaven Seite der oberen Hälfte eine horizontale Komponente des Luftwiderstandes erzeugt wird, deren Richtung nicht durch den Schwerpunkt des Körpers geht. Diese letztere Komponente wirkt der an der hintern Fläche der unteren Hälfte angreifenden gleichsinnig und zwar wird dadurch die konkave Fläche nach aufwärts und die konvexe nach abwärts gedreht.

Wir betrachten hier den Vorgang nur bei ganz ebenen Platten.

Entsprechend dem Momente der drehenden Kraft des Luftwiderstandes in Bezug auf die Schwerpunktsaxe wird somit beim Beginn der Bewegung die nach abwärts gerichtete lange Vorderkante nach aufwärts gedreht und zwar nicht um die Schwerpunktsaxe selbst, sondern, wie wir früher gesehen haben, entsprechend dem Angriffspunkte und der Richtung der Kraft, um eine ausserhalb des Systems liegende

Momentanaxe*) von wechselnder Lage. Diese momentane Drehaxe ist der horizontalen Schwerpunktsaxe des Systems parallel. Sie nähert sich ihr durch die Wirkung der wachsenden Zentrifugalkräfte rasch und strebt in sie über zu gehen, denn die letztgenannte Axe ist, wie früher gezeigt, eine freie und zwar die stabilste Drehaxe des Systems.

Mit der Zunahme der Drehung aus ursprünglich senkrechter Stellung wächst die entstehende horizontale Komponente des Luftwiderstandes (us in der Stellung ab Fig. 3 Taf. V) bedeutend an und verursacht eine zunehmende Abweichung der Bahn von der lothrechten. Sie thut das, indem der Luftwiderstand erstens in Folge der Fallbeschleunigung mit dem Quadrat der wachsenden Geschwindigkeit zunimmt und indem zweitens mit zunehmender Drehung die Projektion der getroffenen Fläche sich vergrössert, wobei der Winkel, welchen die Fläche mit der Widerstandsrichtung einschliesst, wächst. Überschreitet der Neigungswinkel der Platte zur Horizontalen 45^0, so nimmt die Grösse der horizontalen Komponente schliesslich wieder ab, dieselbe erhält sich aber gleichsinnig vom Beginn des Falles (in der Stellung ab Fig. 2) bis zu dem Momente, in welchem die Neigung eine entgegengesetzte zur lothrechten wird, respektive bis zu horizontaler Flächenstellung derselben (bis etwas über die Stellung a_2b_2 Fig. 2 hinaus).

*) Sie liegt auf dem nach rückwärts jenseits des Schwerpunktes verlängerten Hebelarm des statischen Momentes und zwar bei gleichem Angriffswinkel der Kraft um so ferner, je näher der Angriffspunkt an den Schwerpunkt des Systems heranrückt. Greift die Kraft unter rechtem Winkel an, so liegt die Momentanaxe innerhalb des Systems selbst. Vgl. übrigens hiezu die eingehendere Betrachtung solcher Vorgänge bei den „haarförmigen Flugorganen" pag. 78. Denkt man sich eine vertikale Ebene in der Richtung der Queraxe durch eine in der geschilderten Weise vom Luftwiderstand getroffene, fallende Platte gelegt und die Richtung der Resultirenden des Luftwiderstandes als gerade Linie dargestellt, welche die, den Durchschnitt der Platte wiedergebende Linie in ihrem Angriffspunkte trifft, so haben wir wieder ein ähnliches Bild, wie es Fig. 4 Taf. IV darbietet. Abgesehen davon, dass im jetzigen Falle die erzeugte Bewegung rasch beschleunigt wird und in vollständige Rotation übergeht, indem die entgegenstehenden Widerstände überwunden werden, ist der Vorgang in der Art und Weise der Kräftewirkung der nämliche.

Mit der weiteren Drehung entsteht eine, der ersten Horizontalkomponente gegensinnige zweite horizontale Komponente (us_3 in der Stellung $a_3\,b_3$ Fig. 4 Taf. V), welche anfangs wachsend (bis etwas über die Stellung $a_4\,b_4$ Fig. 2 hinaus), dann wieder abnehmend, andauert, bis die Queraxe der Platte in die Bewegungsrichtung fällt (in der Stellung $a_5\,b_5$ Fig. 2). Diese Komponente verzögert die horizontale Geschwindigkeit der drehenden Platte, beschleunigt aber gleichzeitig bis zur quersenkrechten Stellung zur Bewegungsrichtung ($a_4\,b_4$ Fig. 2) die Drehgeschwindigkeit, da der Angriffspunkt der Resultirenden bis zu dieser Stellung mehr oder weniger entfernt von dem Schwerpunkt sich befindet. Die so erzeugten drehenden Kräfte wirken alle der ersten Drehung gleichsinnig. Bei ursprünglich senkrechter Fallstellung wirken sie somit während eines Umdrehungswinkels von nicht weniger als c. 165°. (Bei einer anfänglichen Neigung von 30° der Queraxe zur Horizontalen wirken sie immer noch während eines Drehwinkels von c. 135°).

Erst jenseits der zur Bewegungsrichtung quersenkrechten Stellung ($a_4\,b_4$ Fig. 2) ändert sich die Sachlage. Es rückt nämlich nunmehr der Angriffspunkt des Luftwiderstandes auf die entgegengesetzte Flächenhälfte und entfernt sich dabei immer mehr vom Schwerpunkt bis zum Moment, in welchem die Queraxe in die Bewegungsrichtung selbst fällt (von Stellung $a_4\,b_4$ bis $a_5\,b_5$ Fig. 2). Damit wird aber nunmehr eine der bisherigen Drehrichtung gegensinnige Drehkraft erzeugt, respektive der Widerstand gegen die bisherige Drehung sehr bedeutend gesteigert. Der Drehwinkel, während dessen dies geschieht, beträgt aber nur c. 45°, also nur $^1/_8$ Umdrehung, wogegen die anfangs erzeugten Drehkräfte während eines Drehwinkels von 165° resp. 135°, also während nahezu $^1/_2$ (um $^1/_{12}$ weniger) bis $^3/_8$ einer ganzen Umdrehung wirksam waren.

Durch diese länger dauernde Einwirkung der anfangs wirksamen drehenden Kräfte wird die Geschwindigkeit der Drehung so beschleunigt, dass die erzeugte lebendige Kraft ausreicht, um den, bei weiterer Drehung so bedeutend sich steigernden Luftwiderstand zu überwinden.

Der wesentliche Grund für dieses Verhalten ist also die

Änderung in der Richtung der fortschreitenden Bewegung der Platte, welche während der letzten achtels Umdrehung eine ziemlich starke Krümmung nach abwärts macht. Diese Abwärtskrümmung entsteht, weil während der Zurücklegung des eben besprochenen letzten Umdrehungsstückes in Folge der zur Bahnrichtung nunmehr entgegengesetzten Neigung der Fläche eine nach abwärts gerichtete Komponente des Luftwiderstandes (vs in Stellung ab Fig. 4) zur Entstehung kommt. Bliebe die fortschreitende Bewegung von Anfang an eine geradlinige, so müsste der Widerstand gegen die anfänglich erzeugte Drehung überwiegen, respektive es müsste dieselbe zum Stillstand kommen und sogar bei zunehmender Geschwindigkeit eine Rückwärtsdrehung erfolgen. Es würde überhaupt nur ein Oszilliren um eine zur Bewegungsrichtung quer senkrechte Gleichgewichtslage eintreten, gerade so, als ob die Drehaxe eine feste wäre. Die Momente der einander gegensinnigen Drehkräfte müssten sich bei fester Drehaxe kompensiren, allein nachdem das System sich frei bewegt, wird durch die einseitige Hemmung nur eine momentane Verlegung der Drehaxe erzeugt.

Wenn die beiden Hälften der drehenden Platte beiderseits gleichen Widerstand zu überwinden haben, hält sich die lebendige Kraft der Massentheilchen beider Hälften die Wage, da die Drehaxe eine freie Axe ist. Das drehende System befindet sich also im Gleichgewicht. Sobald aber einseitig stärkerer Widerstand entsteht, büsst die betreffende Hälfte des Systems einen entsprechenden Theil ihrer lebendigen Kraft ein und nun überwiegt die lebendige Kraft der Massentheilchen der anderen Hälfte. Damit muss aber die Lage der momentanen Drehaxe im Körper eine andere werden. Mit wachsender Grösse des Widerstandes rückt dieselbe von der Schwerpunktsaxe hinweg näher zum Angriffspunkt der hemmenden Kraft, respektive nach der Seite, deren Massentheilchen geringere lebendige Kraft besitzen. Bei vollständiger Hemmung würde die, die Angriffspunkte verbindende Linie selbst zur momentanen Drehaxe werden. Damit wird aber sofort die dem Luftwiderstand entgegendrehende Fläche verkleinert und die der Richtung des Luft-

widerstandes gleichsinnig nach rückwärts drehende Fläche vergrössert. Es wird also durch diese Verlegung der Drehaxe der Widerstand gegen die Drehung in dem einmal eingeleiteten Sinne sehr ansehnlich vermindert.

Die ursprünglich eingeleitete Drehung schreitet also bis über die in die Bewegungsrichtung fallende Flächenstellung (a_5 b_5 Fig. 2) hinaus fort. Sobald sie aber dieselbe überschritten hat, treten sofort wieder der Drehrichtung gleichsinnige drehende Kräfte auf und der ganze Gang der Dinge wiederholt sich ähnlich, wie wir es bisher bereits gesehen haben. (Die Stellung a_5 b_5 Fig. 2 entspricht, abgesehen von der Umkehrung der Platte, der Stellung a_1 b_1 und die Platte hat zwischen den beiden Stellungen genau eine halbe Umdrehung gemacht). Ein Unterschied liegt nur darin, dass sich mit jeder halben Umdrehung, wenigstens anfangs, einerseits die lebendige Kraft der Drehung, andererseits aber auch die Grösse der Widerstände noch etwas steigert. Indessen überwiegt anfangs die Steigerung der ersteren, so dass die Widerstände während der jedesmaligen letzten achtels Umdrehung um so leichter überwunden werden.

Es treten also nach jeder halben Umdrehung, wenn die Queraxe aus der Bewegungsrichtung wieder heraustritt, statt der senkrecht nach abwärts gerichteten und der der Bewegung gegensinnigen horizontalen Komponenten neuerdings senkrecht aufwärts gerichtete, und der Bewegung gleichsinnige horizontale Komponenten auf, welche jedesmal einen Wendepunkt der Kurve erzeugen und eine neue Aufwärtskrümmung verursachen. Dabei beschleunigt sich die Translationsbewegung des Systems vom Beginn jeder neuen Umdrehung an bis zur Einnahme horizontaler Stellung der Queraxe, indem während dieser Zeit die horizontale, der Bewegung gleichsinnige Komponente dauernd wirkt. Von dieser Stellung aus nimmt ihre Geschwindigkeit wieder ab bis zur Neuannahme der Anfangsstellung.

Aus dieser Abwechslung in der Richtung und Grösse der wirksamen Komponenten des Luftwiderstandes erklärt sich die von der lothrechten abweichende, wellenförmige Bahn des Schwerpunktes.

Eine besondere Betrachtung bedarf aber die zuneh-

mende Schiefe der Richtung der Gesammtbahn zur lothrechten. Der Grund dieser charakteristischen Bahnkurve ist für den ersten Moment der Bewegung, d. h. für die Bahn, welche während der ersten $^3/_8$ Umdrehung (von Stellung ab bis a_4 b_4 Fig. 2) beschrieben wird, ebenso im weiteren Verlauf für die Anfangsstücke jeder neuen halben Umdrehung (von Stellung a_1 b_1 bis a_4 b_4 Fig. 2) einleuchtend. Es ist die beständige Summirung der lebendigen Kraft der Horizontalgeschwindigkeit, welche erzeugt wird durch die, bis zu einer gewissen Neigung (45^0), wachsende und von da an wieder abnehmende, horizontale Komponente des Luftwiderstandes. Dieselbe wächst um so mehr, als ja der Luftwiderstand mit der wachsenden Projektionsgrösse der getroffenen Fläche im einfachen und mit wachsender Fallgeschwindigkeit im quadratischen Verhältnisse dieser letzteren steigt. Es ist dies im Prinzip dieselbe Bewegung wie wir sie bei der Einstellung der haarförmigen Flugorgane flüchtig berührten, welche sich bei allen flachen Körpern wiederholt und welche besonders charakteristisch bei der Einstellungsbewegung der Flugorgane des X. Typus auftritt, wesswegen wir dort nochmals darauf zu sprechen kommen werden.

Zwischen diesen Phasen der Bewegung sind nun aber, wie wir gesehen haben, andere eingeschaltet, während deren die Bahn konkav nach abwärts gekrümmte Kurven erzeugt. Mit zunehmender Rotationsgeschwindigkeit müssen sich nun offenbar die Unterschiede in der Zeitdauer dieser Phasen vermindern und in Folge dessen die Zeit der Wirksamkeit der entsprechenden Geschwindigkeitskomponenten sowie ihre Wirkungsgrösse selbst einander mehr und mehr gleich werden. Dieses sich gleichwerden entspricht aber einer relativen Abnahme der in der Gesammtbewegungsrichtung wirksamen, horizontalen Geschwindigkeitskomponente und es müsste damit nach der anfänglichen, stärkern Seitenabweichung eine zunehmend steilere Bahn zu stande kommen, respektive die Konkavität der Gesammtbahn müsste nach abwärts, anstatt nach aufwärts gerichtet sein.

Der Grund dafür, dass dies nun gleichwohl nicht der Fall ist, kann offenbar nur in sonstigen Wirkungen der steigenden Rotationsgeschwindigkeit zu suchen sein. Bei

eingehender Prüfung der Bewegung ergeben sich nun zwei Gründe, welche einen, mit der wachsenden Drehgeschwindigkeit ebenfalls wachsenden, nach aufwärts gerichteten Luftwiderstand erzeugen müssen:

Von der zur Bewegungsrichtung quersenkrechten Stellung bis zu dem Moment, wo die Queraxe in der Richtung der Bewegung selbst sich einstellt (also zwischen den Stellungen a_4 b_4 und a_5 b_5 Fig. 2), wird, wie wir gesehen haben, die Rotation um einen unterhalb s_4 gelegenen Punkt der Queraxe gleichzeitig ein tieferes Herabrücken des Schwerpunktes s selbst zu verursachen streben und somit die Abwärtsneigung der Bahn während dieser Zeit steigern.

Die wachsend grössere Länge des oberen, rückwärts drehenden Theiles der Platte kompensirt nun neben einer, noch zu besprechenden und als hemmender Zug wirkenden Luftverdünnung zum bei weitem grössten Teile die Wirkung der Abwärtsverlegung der momentanen Drehaxe, welche an sich eine konkave Abwärtskrümmung der Bahn des Schwerpunktes verursachen muss. Es geht dies daraus hervor, dass der Radius der rück- und abwärts drehenden Elemente durch die Abwärtsverlegung der Drehaxe wächst und damit die lineare Geschwindigkeit der letzteren steigt. Der Luftwiderstand wächst aber mit dem Quadrat der Geschwindigkeit. Es muss demnach sehr rasch die oberste Grenze dieser Verschiebung der Momentanaxe und damit auch der Abwärtskrümmung der Bahn erreicht werden.

Zu der wachsenden Grösse des Restes von lebendiger Drehkraft, mit welcher der vordere, aufwärts drehende Theil des Apparates nun aber über die Richtungslinie der fortschreitenden Bewegung hinausschreitet, addirt sich mit dem Augenblick dieser Überschreitung das Moment der neu entstehenden und der bisherigen Drehung gleichsinnig wirkenden Kräfte. Die so mit jeder Umdrehung wachsende lebendige Kraft der Drehung bewirkt nun eine der vorigen Verlegung der momentanen Drehaxe entgegengerichtete Verlegung, indem sie dieselbe gegen die rückwärtige abwärts drehende Plattenhälfte verschiebt. Diese letztere Verlegung muss aber um so bedeutender sein, als die hintere Plattenhälfte mit dem Augenblick der Überschreitung der Linie der

fortschreitenden Bewegung des ganzen Systems sich gegen den, dieser Bewegung entgegengerichteten Luftwiderstand zu drehen hat. Hier tritt also nicht nur keine Kompensation der Axenverlegung ein, welche durch die neu entstehenden Drehkräfte erzeugt wird, sondern umgekehrt eine Vergrösserung des Abstandes der Momentanaxe von der Schwerpunktsaxe. Die Folge davon ist aber eine entsprechende Aufwärtskrümmung der Bahn des Schwerpunktes. Die erstere Verlegung des Schwerpunktes wird grösstentheils kompensirt und zwar wirken dabei aufwärts und abwärts gerichtete senkrechte Luftwiderstandskomponenten ein, wogegen bei der letzteren nur aufwärts gerichtete Komponenten zur Wirkung kommen. Das Verhältniss der Differenz der entgegengesetzt wirkenden Kräfte beim ersteren Vorgang zu der Summe der gleichwirkenden Kräfte beim letzteren ändert sich aber während der Bewegung fortwährend, indem die letztere Grösse mit wachsender Geschwindigkeit der Drehung stärker anwächst als die erstere.

Direkt experimentell lässt sich dieses theoretisch geschlossene Verhalten im vorliegenden Falle nicht leicht erweisen, es wäre dagegen sehr wohl möglich, durch eine fortgesetzte Reihe photographischer Momentaufnahmen die genaue Kurve des Schwerpunktes und die jeweilig entsprechende Stellung des Apparates zu fixiren und so indirekt den Beweis zu liefern. Auch rechnerisch liesse sich die Nothwendigkeit dieses Verhaltens erweisen, indess würde uns dies weiter auf rein mathematisch-mechanisches Gebiet abführen, als hier beabsichtigt ist.

Im übrigen lässt sich die Verlegung der Momentanaxe drehender Körper bei ungleichem Widerstand, sowie ihre Wirkung durch einen sehr einfachen Versuch zeigen. Wenn man einen zylindrischen Holzstab durch eine etwas dickere, durchbohrte Kugel steckt und darin so befestigt, dass der Schwerpunkt des Ganzen im Zentrum der Kugel sich befindet und nun den Apparat auf glatter Unterlage in horizontale Rotation versetzt, so wird sich bei mehr oder weniger vollkommener Hemmung einer Seite der mittlere Theil des Apparates, welcher den Schwerpunkt enthält, mehr oder weniger stark nach rückwärts verschieben, wenn wir die

Bewegung der gehemmten Seite als nach vorwärts gerichtet betrachten. Beim nächsten Haupttypus kommen übrigens gleiche, nur etwas einfacher gelagerte Vorgänge, welche analoge Wirkungen erzeugen, nochmals zur Sprache. —

Ausserdem war folgender wichtige Punkt zu beachten:

Es ist eine bekannt physikalische Thatsache, dass in der Luft rotirende Körper, welche sich frei in zu ihrer Drehaxe senkrechter Richtung bewegen, von der geraden Bahn, d. h. von der Richtung der wirksamen Kraft abweichen, und zwar nach derjenigen Seite des drehenden Körpers, welche von vorn (im Sinne der fortschreitenden Bewegung) nach rückwärts sich dreht. Man kann den Vorgang sehr schön beobachten, wenn man einen aus Papier hergestellten leichten hohlen Zylinder mit geschlossenen Enden in horizontaler Axenstellung in Rotation versetzt, z. B. durch einen herumgewickelten und rasch vertikal in die Höhe gezogenen Zwirnsfaden, oder, indem man ihn von einer geneigten Ebene herabrollen und dann frei fallen lässt. Der drehende Zylinder bewegt sich beim freien Fall nämlich nicht lothrecht, sondern in einer, unter schiefem Winkel geneigten Bahn zur Erde und zwar nach der Seite hin, wo die Drehung der Zylinderfläche nach aufwärts, also umgekehrt wie die fortschreitende Bewegung des ganzen Zylinders vor sich geht. Die Bahn des Schwerpunktes stellt dabei eine, mit ihrer Konkavität nach abwärts gerichtete Kurve dar.

Es widerspricht dies scheinbar den mechanischen Gesetzen, welche sich auf das Verhalten drehender Körper im luftleeren Raum beziehen, indem hier ein rotirender frei fallender Körper in Folge der Rotation nie von der senkrechten geradlinigen Bahn abweichen würde.

Ähnlich der von Magnus*) erklärten Abweichung rotirender Geschosse kann auch diese Erscheinung nur auf der Verdichtung der Luft auf der nach vorwärts und der Verdünnung der Luft auf der nach rückwärts drehenden Seite beruhen, damit aber auf dem grösseren Widerstand auf der ersteren und dem geringeren Widerstand auf der letztern. Die einerseits stark verdichtete Luft erzeugt einen

*) „Über die Abweichung der Geschosse“ in Abh. der Berl. Akad. 1852.

Druck nach der Seite hin, wo eine Luftverdünnung vorhanden ist, und da dies auf der gegenüberliegenden Seite der Fall ist, so entsteht eine Kraft, welche mehr oder weniger senkrecht zur geradlinigen Richtung der Schwerkraft wirkt. Der rotirende Zylinder weicht in Folge dessen im Falle nach der Seite aus. Der Betrag des horizontal wirkenden Druckes und damit der erzeugten Horizontalbewegung mindert sich hier aber mit der in Folge der Luftreibung allmählich abnehmenden Rotationsgeschwindigkeit des Zylinders, in Folge dessen wird die erzeugte Bahnkurve allmählich steiler und geht schliesslich in senkrechter Richtung über.

Ganz ebenso muss sich nun bei der senkrechten Rotation der länglichen Platte auf der der Bewegungsrichtung gleichsinnig drehenden Seite eine Luftverdichtung, auf der entgegengesetzten aber eine Luftverdünnung geltend machen und zwar muss der Unterschied dieser beiderseitigen Luftspannung mit zunehmender Rotationsgeschwindigkeit ebenfalls wachsen und einen an Geschwindigkeit zunehmenden aufsteigenden Luftstrom erzeugen. Die Sache liegt hier zwar nicht so günstig für die Einwirkung dieses ungleichen Widerstandes, wie bei dem, in der Drehrichtung allseitig gleichgestalteten Zylinder, bei welchem keine Unterbrechung der ungleichen Luftverdichtung und damit der seitlichen Druckwirkung eintritt, aber trotzdem muss auch hier ein ansehnlicher Druck in der Richtung von der vorwärts drehenden zu der rückwärts drehenden Seite stattfinden, denn der durch die Drehung erzeugte Luftwirbel muss bei gleicher Rotationsgeschwindigkeit in Folge der flachen Gestalt der Körper ein viel heftigerer sein.

Betrachten wir die verschiedenen Stellungen während einer halben Umdrehung der Platte, so ergibt sich sofort, dass der grösste Unterschied in der Luftdichte ober- und unterhalb der beschriebenen Bahn eintreten muss in der Zeit, während die Queraxe möglichst grosse Winkel mit der Bewegungsrichtung bildet (also in Stellungen, welche derjenigen a_4 b_4 Fig. 2 nahekommen).

In diesen Stellungen bewegt sich die obere Hälfte der Platte dem ihrer translatorischen Bewegung entgegengesetzten Luftstrome gleich, die untere Hälfte demselben entgegen-

gesetzt. Überschreitet die lineare Geschwindigkeit der gleichsinnig drehenden oberen Hälfte die Geschwindigkeit der Luftströmung, so muss auf ihrer, der letzteren zugekehrten Flächenseite eine Luftverdünnung entstehen, wogegen auf der gleichen Seite der unteren Hälfte in jedem Fall eine Luftverdichtung erzeugt werden muss. Der Unterschied der beiderseitigen Luftkompression muss schon bei ganz langsamer Drehung vorhanden sein, mit zunehmender Geschwindigkeit aber immer bedeutender werden und auch während eines zunehmend grösseren Drehungswinkels zur Entstehung kommen. Dieser Dichtigkeitsunterschied bedingt aber Ausgleichsströmungen, welche mehr oder weniger die Richtung von unten nach oben haben müssen. Es werden also während der beschleunigten senkrechten Rotation an Stärke fortwährend zunehmende aufsteigende Luftströmungen erzeugt, welche längs der rotirenden Platte aufwärts gleitend, senkrecht in die Höhe gerichtete Komponenten erzeugen müssen.

Man kann diese aufsteigenden Luftströme während der raschen Rotation nicht sichtbar machen, dagegen gelingt es, wenigstens den Beweis für die negative Tension der Luft auf der rückwärts drehenden und für die positive Tension auf der vorwärts drehenden Seite der rotirenden Platte durch folgendes Experiment direkt zu erbringen:

Ich spannte ein 150 cm langes, 50 cm breites, sehr grobmaschiges Netz aus dünnem Eisendraht quer horizontal in seiner Längsrichtung schief geneigt (Fig. 5 u. 6 Taf. V) so auf, dass ein wie bei den früher beschriebenen Fallversuchen auf bekannter Bahn sich bewegendes, nicht zu kleines und leichtes Modell (a b Fig. 6 Taf. V) ein Stück weit sich in geringem Abstand dicht darunter oder darüber entlang bewegen musste. Auf der Unterseite des Drahtnetzes befestigte ich eine grössere Anzahl schmaler Streifchen feinsten Seidenpapiers von 4 mm Breite und 11 cm Länge indem ich sie in der Mitte ihrer Länge an einem Querdraht so festklebte, dass ihre Längsrichtung mit derjenigen des Drahtnetzes zusammenfiel. Die feinen Enden dieser Papierstreifchen machten in Folge ihres Eigengewichtes in ruhiger Luft einen leichten Bogen nach abwärts und bewegten sich beim leichtesten Luftzuge (pp Fig. 5 und 6 Taf. V).

Das Modell bestand aus einem 5 cm breiten, 20 cm langen ziemlich starken Kartonblatt, welchem ich, damit es sicher die gewünschte Bahn einschlage, in querer Richtung eine ganz schwache konvexe Krümmung gab. Ich liess dasselbe mittelst einer, in 2 m Höhe an einer Wand angebrachten Vorrichtung (Fig. 1 a u. b Taf. VI) in quer senkrechter Stellung fallen, indem es bei leichtem Zug an einem Bindfaden (f) von einer an diesem befestigten, aus einem Korkstück hergestellten Klammer (k), welche es lose hielt, durch zwei oberhalb angebrachte, feste Querhölzchen (qq) herausgestreift wurde.

Liess ich nun das Modell unterhalb des Drahtnetzes sich entlang bewegen, so bogen sich jedesmal die dem Modelle benachbarten Papierstreifen mit kräftigem Ruck ihm zu (p_1 Fig. 6) und bewiesen damit, dass am oberen Ende des Modells eine bedeutende Luftverdünnung statt hat, welche zum Theil durch von oben zuströmende Luft normaler Spannung ausgeglichen wird.

Liess ich umgekehrt das Modell längs der oberen Fläche des Drahtnetzes sich herabbewegen, so bewegten sich die freien Enden der jeweils benachbarten Papierstreifchen mit eben so heftigem Ruck von ihm hinweg (p_2 Fig. 6), womit der Beweis einer Luftverdichtung auf der untern Seite der Bahn des Körpers erbracht ist. Nachdem so ein sichtbar zu machender Ausgleich der negativ und positiv verdichteten Luft mit der umgebenden Luft von mittlerer Dichte stattfindet, so ist daraus mit Sicherheit zu schliessen, dass ebenso und noch viel mehr ein Ausgleich zwischen den beiden entgegengesetzten Dichten der Ober- und Unterseite stattfinden müsse. Es muss somit ein aufsteigender Luftstrom von bedeutender Geschwindigkeit von dem Ort der komprimirten zu dem der verdünnten Luft erzeugt werden. Mit zunehmender Drehgeschwindigkeit muss derselbe aber während eines immer grösseren Winkels einer Umdrehung entstehen und gleichzeitig an Stärke zunehmen.

Schliesslich nähern sich die sämmtlichen wirksamen Kräfte einem Gleichgewichtszustande und damit tritt, bei dauernd horizontaler Stellung der Längsaxe, immer mehr eine, asymptotisch einer Geraden sich nähernde Gesammt-

bahnrichtung mit gleichgrossen sekundären Kurven und gleichförmiger Dreh- und fortschreitender Geschwindigkeit ein.*)

β) Einiges experimentelle zur Kenntniss der näheren Bedingungen der Bewegung.

Es ist hier der Ort, auf einige bisher nicht berücksichtigte Verhältnisse der Rotations-Bewegung einzugehen. Lassen wir Modelle von gleichdickem und gleichschwerem Papier in der geschilderten Weise funktioniren, so ist leicht festzustellen, dass Bahn und Rotationsgeschwindigkeit, und damit die senkrechte Fallgeschwindigkeit oder Leistungsgrösse eine andere wird, wenn wir bei gleichem Flächeninhalt der Platten das Verhältniss von Länge und Breite ändern. Dasselbe ist der Fall, wenn wir mit oder ohne Änderung dieses Verhältnisses den Flächeninhalt vergrössern oder verkleinern. Aus einer grössern Zahl von Versuchsreihen, welche ich angestellt habe, um Einblick in diese Vorgänge zu erlangen, will ich, um nicht allzu weit in, den zulässigen Raum überschreitende Einzelheiten zu gerathen, einige wenige charakteristische Daten hier mittheilen.

Ich schicke voraus, dass alle für die Versuche I bis IV benützten Modelle aus ein und demselben Bogen gleichdicken und gleichschweren glatten Schreibpapiers, welches in Bezug

---

*) Die Kraftquelle ist das Gewicht des fallenden Körpers und dementsprechend ist die gesammte Arbeitsleistung bei gleichem Gewicht in Wirklichkeit immer die gleiche, ob ein Körper sich dreht oder nicht. Dagegen ist die Ausnützung der Arbeit eine sehr verschiedene und zwar ermöglicht gerade die lebendige Kraft der Drehung eine weitaus höhere Ausnützung. Die totale lebendige Kraft dieser zusammengesetzten Bewegung ist, wenn die fortschreitende Drehaxe des Körpers eine Schwerpunktsaxe ist, gleich der Summe der lebendigen Kräfte der beiden Einzelbewegungen. Nachdem die lebendige Kraft der fortschreitenden Bewegung für die Masse M und die Geschwindigkeit v gleich $\frac{Mv^2}{2}$ und diejenige der Drehbewegung für das Trägheitsmoment T und die Winkelgeschwindigkeit ω gleich $\frac{T\omega^2}{2}$ ist, so ist die lebendige Kraft für die Gesammtbewegung

$$L = \frac{Mv^2}{2} + \frac{T\omega^2}{2}.$$

auf Gleichmässigkeit erst geprüft worden war, sorgfältig hergestellt wurden. Dasselbe wog im Mittel 0,10359 mgm auf 1 qmm und die grösste Abweichung betrug 8 Zehntausendstel. Die aus ungleichem Papiergewicht entstandenen Fehler sind somit so gering, dass sie für die hier beabsichtigte Verwendung der Beobachtungsresultate keine Bedeutung besitzen. Auch kleine Fehler, welche durch unabsichtliche Verbiegungen oder durch geringe Änderung in der anfänglichen Fallstellung entstehen, sind nicht ganz auszuschliessen, doch für uns ebenfalls ohne irgendwie wesentliche Bedeutung.

Für die Herstellung der Modelle zum Versuch V wurde womöglich noch grössere Vorsicht angewendet, weil hier gleichzeitig eine Berechnung der Trägheitsmomente und Vergleich mit den Rotationsgeschwindigkeiten angestellt werden sollte. Auch hier waren die Modelle aus einem Papierbogen des gleichen Papiers hergestellt, welches im Mittel aber nur 0,10125 mgm auf den qmm wog und erst in der vierten Dezimale Schwankungen des Gewichtes erkennen liess.

Die Modelle wurden bei den Versuchen alle aus quer steil geneigter Stellung und zwar unter einem Winkel von 80^0 zur Horizontalen fallen gelassen und die Masse der Fallhöhe wie der horizontalen Abweichung von der lothrechten sind vom Schwerpunkt des betreffenden Modelles resp. dessen horizontaler Projektion auf die Auffallfläche aus gerechnet. Die Versuche wurden für jedes Modell vielfach wiederholt und das grösste erlangte Resultat benützt.

Auf grössere Fallräume diese Versuche auszudehnen, wäre einerseits zwar wünschenswerth gewesen, andererseits aber werden die Resultate immer weniger zuverlässig, indem in Folge von Verhältnissen, auf welche wir im nächsten Abschnitt kommen werden, bei höheren Fallräumen immer stärkere Krümmungen der Bahnlinie in ihrer Horizontalprojektion und gleichzeitig Neigungen der Längsaxe zum Horizont eintreten. Dadurch wird aber einestheils die Länge der horizontalen Bahn unsicher und anderntheils die Fallzeit verringert, indem die horizontale Projektion der Platten verkleinert wird.

I.

Verhältn. von $\frac{\text{Länge}}{\text{Breite}}$ in mm der Modelle.		Horizont. Abweich. der Bahn von der lothrechten in cm
Fallhöhe 101,5 cm	$\frac{160}{80}$	110
	$\frac{80}{40}$	92
	$\frac{40}{20}$	80
	$\frac{20}{10}$	73
	$\frac{10}{5}$	60

II.

Verhältn. von $\frac{\text{Länge}}{\text{Breite}}$ in mm der Modelle.		Horizont. Abweich. der Bahn von der lothrechten in cm
Fallhöhe 101,5 cm	$\frac{80}{80}$	78
	$\frac{40}{40}$	62,5
	$\frac{20}{20}$	45
	$\frac{10}{10}$	36
	$\frac{5}{5}$	25

III.

Verhältn. von $\frac{\text{Länge}}{\text{Breite}}$ in mm		Horizont. Abweich. der Bahn von der lothrechten in cm
Fallhöhe 101,5	$\frac{20}{20}$	45
	$\frac{40}{20}$	80
	$\frac{80}{20}$	116
	$\frac{160}{20}$	136

IV.

Verhältn. von $\frac{\text{Länge}}{\text{Breite}}$ in mm	Reducirt. Verhältn.	Horizont. Abweich. der Bahn von der lothrechten in cm bei Fallhöhe 101,5 cm	bei Fallhöh 135 cm	Fallzeit auf 135 cm Höhe in Sek.
$\frac{80}{80}$	$\frac{1}{1}$	89	122	1,8
$\frac{80}{40}$	$\frac{2}{1}$	101	134	2,0
$\frac{80}{20}$	$\frac{4}{1}$	118	150	2,1
$\frac{80}{16}$	$\frac{5}{1}$	125	160	2,2
$\frac{80}{13,3}$	$\frac{6}{1}$	119	153	2,15
$\frac{80}{11,4}$	$\frac{7}{1}$	118	150	2,2
$\frac{80}{10}$	$\frac{8}{1}$	115	148,5	2,2
$\frac{80}{5}$	$\frac{16}{1}$	110	135	2,0
$\frac{80}{4}$	$\frac{20}{1}$	73	109	1,9
$\frac{80}{3}$	$\frac{26,6}{1}$	61	89,5	1,7

V.

Verhältn. von $\frac{\text{Länge}}{\text{Breite}}$ in mm	Reduzirtes Verhältn.	Flächeninhalt in □mm	Horizont. Abweich. d. bei 101,5 cm Fallhöhe
$\frac{100}{8}$	$\frac{10}{1}$	800	92
$\frac{84,85}{9,42}$	$\frac{9}{1}$	"	113
$\frac{80}{10}$	$\frac{8}{1}$	"	117
$\frac{74,83}{10,69}$	$\frac{7}{1}$	"	117
$\frac{69,24}{11,54}$	$\frac{6}{1}$	"	116,5
$\frac{63,24}{12,64}$	$\frac{5}{1}$	"	107,5
$\frac{56,56}{14,14}$	$\frac{4}{1}$	"	98
$\frac{48,99}{16,32}$	$\frac{3}{1}$	"	95
$\frac{40}{20}$	$\frac{2}{1}$	"	81
$\frac{28,28}{28,28}$	$\frac{1}{1}$	"	56,5

*) Die Zahl der halben Umdrehungen beträgt mindestens 80. In Wirklichkeit muss sie aber etwas höher sein. Innerhalb $31\frac{1}{2}$ cm Fallhöhe macht das Modell nach sehr zahlreichen Versuchen genau $5\frac{1}{2}$ Umdrehungen, und zwar nach 12 cm 1, 18 cm 2, 23 cm 3, 27 cm 4, 30 cm 5, und $31\frac{1}{2}$ cm $5\frac{1}{2}$. Darüber hinaus wird die direkte Zählung unsicher. Die letzte Umdrehung findet während eines Fallraumes von 3 cm statt. Berechnen wir den Rest von 135 cm Fallhöhe also $103\frac{1}{2}$ cm danach, so müssen während desselben, wenn wir die Drehung als nicht weiter beschleunigt annehmen, $34\frac{1}{2}$ Umdrehungen stattfinden. Hiezu die $5\frac{1}{2}$ während der ersten $31\frac{1}{2}$ cm gerechnet, gibt also 40 Umdreh. = 80 halbe Umdrehungen. Zweifellos nimmt aber die Beschleunigung noch etwas zu, in Folge dessen muss die Zahl noch etwas grösser sein.

Bahn von der lothrechten bei 135 cm Fallhöhe	Fallzeit in Sek. bei 135 cm Fallhöhe	Zahl der halben Umdrehungen bei 135 cm Fallhöhe
130	2,1	—
156	2,2	c. 80 *)
157	2,2	—
153?	2,2	—
156½	2,2	c. 57 **)
136	2,2	—
134	2,1	—
125	1,95	c. 41 ***)
108	1,8	—
75	1,4	10

**) Der Mindestbetrag der halben Umdrehungen. In den ersten 41 cm Fallhöhe macht das Modell 5 Umdrehungen, davon die letzte in 4 cm Fallhöhe. Legen wir diese Zahl zu Grunde, so erhalten wir für die übrigen 94 cm 23½ Umdrehungen. Also 23½ + 5 = 28½ Umdrehungen = 57 halbe Umdrehungen. Zweifellos beschleunigt sich die Drehgeschwindigkeit noch etwas, doch liess sich dies nicht mehr sicher feststellen.

***) Mindestbetrag. In den ersten 36 cm Fallhöhe 4 Umdrehungen, davon die beiden letzten in je 6 cm Fallraum. Legen wir diese Zahl zu Grund, so haben wir für die übrigen 99 cm 16½ Umdrehungen. Also 16½ + 4 = 20½ Umdrehungen = 41 halbe Umdrehungen.

Betrachten wir nunmehr die in vorstehenden 5 Tabellen enthaltenen Versuchsresultate, so sehen wir folgendes:

Zunächst ergeben die Tabellen I und II, von denen die letztere gleichzeitig die Verhältnisse des V. Typus illustrirt, dass bei gleicher Gestalt der Platten, d. h. gleichem Verhältniss von Länge und Breite, mit wachsendem Flächeninhalt der in horizontaler Richtung zurückgelegte Weg wächst. Da die Fallzeit mit der Grösse des horizontalen Weges aber, wie die IV. und V. Tabelle zeigen, in sehr nahem direktem Verhältniss steht, so wächst unter solchen Bedingungen also mit dem Flächeninhalt der Platte auch die Leistungsfähigkeit.

Ähnlich zeigt die Tabelle III, dass mit wachsender Länge, bei gleichbleibender Breite, also ebenfalls mit wachsendem Flächeninhalt der Platten, der horizontal zurückgelegte Weg und damit die Leistungsfähigkeit wächst. Dieselbe steigert sich hier sogar viel bedeutender, als nach den vorigen beiden Tabellen, obschon der Flächeninhalt immer nur um das doppelte (nicht um das 4 fache, wie vorhin) ansteigt.

Die wichtigsten Resultate endlich finden sich in den beiden letzten Tabellen. In der IV. tritt mit abnehmender Breite, bei gleichbleibender Länge, also unter Abnahme des Flächeninhaltes auffallender Weise Zunahme des horizontalen Weges und der Fallzeit ein und diese Zunahme erhält sich, bis bei Platte $\frac{5}{1}$ mit der Breite der Flächeninhalt ebenfalls auf ein Fünftel reduzirt ist. Hier erreicht die Leistungsfähigkeit ihr Maximum, um bei noch weiterer Verschmälerung wieder abzunehmen. Dabei entsprechen die beiden ganz verschieden breiten Platten $\frac{80}{20}$ und $\frac{80}{11{,}4}$ und ebenso $\frac{80}{40}$ und $\frac{80}{5}$ ziemlich genau. Man kann zugleich erkennen, dass, wenn noch eine entsprechende Zahl von Zwischenstufen eingeschaltet wäre und wenn man die Reihe weiter fortsetzen würde, nahes Zusammenfallen der Leistungsfähigkeit bei zunehmendem Breiteunterschied sich vielfach wiederholen würde.

Die V. Tabelle zeigt, welches Verhältniss von Länge und Breite bei gleichbleibendem Flächeninhalt das günstigste für die Leistungsfähigkeit ist. Wie man sieht, ist es das Verhältniss $\frac{8}{1}$; nahestehen $\frac{6}{1}$, $\frac{7}{1}$ und $\frac{9}{1}$ und auch hier wiederholt sich, wie in der vorigen Tabelle, eine gewisse Übereinstimmung je zweier in ihrer Gestalt immer weiter auseinander weichender Platten. Die 4 Modelle von $\frac{6}{1}$ bis $\frac{9}{1}$ stehen sich übrigens in ihrer Leistungsfähigkeit so nahe, dass bei den verschiedenen hier möglichen Fehlerquellen auf die kleinen Unterschiede kein allzu grosser Werth gelegt werden kann. Es beweist dies schon das abnorme Verhalten von Modell $\frac{7}{1}$ in der Grösse seiner Horizontalbahn bei höherem Fallraum.*)

In dieser Tabelle sind auch einige Umdrehungszahlen enthalten. Abgesehen von der Zahl 10, welche genau ist, da sie direkt durch Zählung während der ganzen Dauer der Bewegung erhalten wurde, sind es aber nur angenäherte Zahlen, welche hinter der Wirklichkeit etwas zurückbleiben, da die Beschleunigung der Drehung ja andauert. Die Drehungen erfolgen viel zu rasch, um sie direkt während der Bewegung zu messen. Die Zahlen zeigen, dass bei gleichbleibendem Flächeninhalt mit zunehmender Verschmälerung der Platten die Drehgeschwindigkeit steigt.

---

*) Weniger biegsames Material, als Papier wäre zu solchen Versuchen geeigneter. Es stand mir zur Zeit kein anderes zu Gebote. Nach einer andern Versuchsreihe schien das Verhältniss $\frac{7}{1}$ das günstigste für die Ausnützung des Luftwiderstandes. Indessen enthielt diese Reihe einige andere kleine Abweichungen von dem vermuthlichen gesetzmässigen Verhalten. Sehr wahrscheinlich liegt das günstigste Flächenverhältniss zwischen $\frac{7}{1}$ und $\frac{8}{1}$. Da es sich hier um sehr kleine Unterschiede handelt, so wären, um dies ganz bestimmt festzustellen, weitere, sehr sorgfältig anzustellende Fallversuche nöthig. Möglicherweise ist auch das Verhalten bei anderem Flächeninhalt ein etwas verschiedenes. Die eingehendere Verfolgung dieser Verhältnisse würde uns hier zu weit auf das rein mechanische Gebiet führen.

Was nun den eigentlichen Grund aller dieser höchst auffallenden Verschiedenheiten anlangt, so kann derselbe einerseits nur in der mehr oder weniger grossen Schwierigkeit des Luftabflusses liegen, welchen die verschieden grossen und verschieden gestalteten Platten darbieten, also in der Grösse des Luftangriffs resp. der statischen Momente, andererseits in dem jeweilig sehr verschiedenen Trägheitsmoment der Platten. Im Einzelnen liegen aber die Verhältnisse, wie bei allen Fragen des Luftwiderstandes, sehr verwickelt. Es ist selbstverständlich unmöglich, hier auf alle Einzelfragen nach den Gründen des verschiedenen Verhaltens, wie es die 5 Tabellen darbieten, einzugehen, ich werde mich daher darauf beschränken, die Resultate der wichtigsten, nämlich der V. Tabelle, in Kürze zu erörtern.

Bei Gelegenheit der haarförmigen Flugorgane habe ich auseinandergesetzt, dass in Folge des erleichterten seitlichen Luftabflusses bei sehr schmalen Körpern die Druckdifferenz zwischen den End- und Mittelstücken der getroffenen Fläche eine wesentliche geringere ist als bei breiteren und dass in Folge dessen bei Schiefstellung der Längsaxe einer solchen Fläche zum Luftwiderstand die Verschiebung des Angriffspunktes der Resultirenden nur eine sehr geringe sein kann. Die Thatsache, dass geringe Verschiebung des Schwerpunktes bei einem geraden Haare senkrechte Fallstellung bewirkt, beweist dies. Je breiter man nun eine solche Fläche werden lässt, um so mehr kann der Schwerpunkt nach der Seite verschoben werden, ohne dass senkrechte Fallstellung eintritt und wenn man schliesslich zu einer vollständigen Umwechslung der beiden Dimensionen übergeht, d. h. die ursprüngliche Länge zur Breitendimension verkürzt, die frühere Breitendimension zur Länge werden lässt, so nehmen sogar Platten, deren Schwerpunkt bedeutend gegen eine der nunmehrigen Längskanten verschoben wird, eine zum Horizont relativ nur wenig schiefe stabile Lage an. Sie stellen sich so, dass die verlängerte Resultirende aller Drücke durch den Schwerpunkt geht.

Mit dem breiter resp. länger werden einer Platte mit medianem Schwerpunkt wird also der Angriffspunkt des Luftwiderstandes bei gleichwinkeliger Schiefstellung immer

weiter vom Schwerpunkt wegverlegt, resp. der Hebelarm des angreifenden statischen Momentes wächst.

Bei rechtwinkligen Platten von gleichem Flächeninhalt, aber verschiedenem Verhältniss von Länge und Breite muss bei zunehmender Länge und abnehmender Breite der Gesammtdruck zwar etwas abnehmen, indem in letzterem Fall die Zahl der Randflächentheile eine grössere wird, aber der wirksame Hebelarm des statischen Momentes, welcher bei gleicher Neigung beider Flächen zum Luftwiderstand absolut genommen mit der Verschmälerung der Platte abnimmt, muss gleichzeitig (wenigstens bis zu einer gewissen Grenze der Verbreiterung) relativ nicht unbedeutend wachsen.

Die Verkürzung des Hebelarmes beim Schmälerwerden der Platten würde ohne sonstige Beeinflussung durch das relative Längerwerden derselben wenigstens annähernd dem Verhältniss der Verschmälerung entsprechen, so dass derselbe beispielsweise bei der Umwandlung des Verhältnisses $\frac{\text{Länge}}{\text{Breite}}$ von $\frac{48{,}99}{16{,}32}$ in $\frac{84{,}45}{9{,}42}$ nicht einmal um die Hälfte kürzer würde.

Dieser, nicht einmal einer Halbierung des Hebelarmes und damit des ganzen statischen Momentes entsprechenden Verkleinerung steht nun aber gegenüber eine viel bedeutendere Verminderung des Trägheitsmoments. Während die erstere Platte in Bezug auf ihre Längsaxe ein Trägheitsmoment von $17777\,\gamma$ (wenn γ das Gewicht der Flächeneinheit $=$ 1 qmm der gleichdicken homogenen Platte in mgm bedeutet) besitzt, ist das entsprechende Trägheitsmoment bei der zweiten Platte $5929\,\gamma$, also gleich dem dritten Theile des ersteren. Nachdem die erzeugte Winkelgeschwindigkeit einer Drehung aber gleich $\frac{\text{Kraft} \times \text{Hebelarm}}{\text{Trägheitsmoment}}$ ist, so muss mit dem, im Verhältniss zum statischen Moment nahezu um das doppelte abnehmenden Trägheitsmomente die Winkelgeschwindigkeit um eben so viel wachsen. In der That habe ich, wie die Tabelle zeigt, bei der ersteren Platte 41, bei der letzteren 80 halbe Umdrehungen auf die gleichen Fallräume und wenigstens nahekommende Fallzeiten gezählt. Auf dieser so bedeutend gesteigerten Rotationsgeschwindigkeit be-

ruht im Wesentlichen die steigende Leistungsfähigkeit bei abnehmender Breite der Platten.

Einen Ueberblick über diese Verhältnisse bietet die Berechnung der jeweiligen Trägheitsmomente in Bezug auf die Längsaxe bei der ganzen Plattenreihe der V. Tabelle. Wendet man die Gleichung für das Trägheitsmoment (T) einer dünnen homogenen rechtwinkeligen Platte in Bezug auf ihre Längsaxe z

$$T_z = \frac{l\,b^3}{12}\,\gamma$$

an, worin l die Länge, b die Breite in Millimetern und γ das Gewicht der Flächeneinheit pro qmm in mgm bedeutet, so erhält man für die Platte $\frac{28{,}28}{28{,}28}$

$$T_z = \frac{28{,}28^4}{12}\,\gamma$$

$$T_z = 53333\,\gamma$$

Für die Platte $\frac{40}{20}$ berechnet sich T_z zu $26666\,\gamma$, für $\frac{48{,}99}{16{,}32}$ zu $17777\,\gamma$ u. s. w. Man sieht also, dass die Trägheitsmomente mit dem sich ändernden Dimensionsverhältniss $\frac{1}{1}, \frac{2}{1}$ $\frac{3}{1}$ ..... $\frac{10}{1}$ sich vermindern in der Reihenfolge $\frac{1}{1}, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}$ ..... $\frac{1}{10}$, wogegen die Breiten der Platten und damit die statischen Momente nur etwa in dem Verhältniss von 28,28 : 20 : 16,32 : 14,14 ..... oder 1 : 0,7 : 0,57 : 0,5 ..... 0,28 abnehmen.

Mehr oder weniger ähnlich liegen die Verhältnisse bei den anderen Tabellen, doch ist es nicht möglich, hier weiter darauf einzugehen.

Interessant in den verschiedenen Tabellen ist das korrespondirende Verhalten an Gestalt sehr unähnlicher Platten, wie beispielsweise der Platten $\frac{80}{40}$ und $\frac{80}{5}$ in der IV. Tabelle. Die Leistungsgrösse der beiden Platten stimmt trotz der um das 8 fache verschmälerten Breitendimension und Flächengrösse nahezu überein.

Wenn übrigens die Breite unter einen gewissen Werth, hier unter 5 mm sinkt, so drehen sich die Platten immer weniger leicht und fallen leicht in horizontaler Stellung mit geringen Schwankungen zu Boden. Es tritt hier in Folge allzu leichten Luftabflusses, welcher nach der Quere der Platten keinen hinreichenden Unterschied in der Druckgrösse und keine genügende Verschiebung des Angriffspunktes ermöglicht, ein Verhalten ein, welches sich dem der haarförmigen Körper nähert.*)

Fallzeiten der verschiedenen Platten sind nur für die höheren Fallräume angegeben, da bei den geringeren die Unterschiede zu klein werden und bei der Methode der Messung zu bedeutende Ungenauigkeiten sich einschleichen. Bei noch bedeutenderen Fallhöhen dagegen wird das Resultat aus anderen, schon angeführten Gründen getrübt. Im Allgemeinen fällt, wie sich aus vielen Beobachtungen ergab, das Wachsen der Fallverzögerung, also der Leistungsgrösse, mit dem Wachsen des in horizontaler Richtung zurückgelegten Weges zusammen, ohne dass freilich begreiflicher Weise die Verhältnisse im einzelnen ganz vollständig übereinstimmen. Ebenso verhält es sich mit der Drehgeschwindigkeit der Platten. Dieselbe nimmt im Allgemeinen mit abnehmender Breite zu. Bis zum Maximum des zurückgelegten horizontalen Weges fällt bei gleichbleibendem Flächeninhalt (und ebenso auch bei nur gleichbleibender Breite) das Wachsen der Längendimension ebenfalls mit wachsender Drehgeschwindigkeit zusammen. Diese nimmt aber bei weiterer Verschmälerung noch immer zu, während die Grösse des zurückgelegten Horizontalweges bereits wieder abnimmt. Die wachsend beschleunigte Drehungsgeschwindigkeit ist schliesslich nicht mehr im Stande, den Ausfall an Flächengrösse zu kompensiren, wie sie es anfangs in reichlichem Masse that.

Was die Gestalt der zurückgelegten Bahnen anlangt, so sind in Fig. 7 Taf. V als Beispiele die Bahnen der Modelle $\frac{1}{1}$, $\frac{2}{1}$, $\frac{3}{1}$ und $\frac{6}{1}$ nach der Grösse der horizontalen

*) Bei Platten aus dünnerem Material dürfte die Breite noch abnehmen ohne dass die Drehung wesentlich erschwert würde.

Abweichungen von der lothrechten bei verschiedenen Fallhöhen, welche je um 10 cm differirten, in ihrem annähernden Gesammtverlaufe dargestellt.

Zum Vergleiche der Leistungsgrössen der verschiedenen Modelle der V. Tabelle habe ich die theoretische gleichmässige Fallgeschwindigkeit für 800 qmm Flächeninhalt und das Gewicht von 81 mgm berechnet und dieselbe zu 1,239 m pro Sekunde gefunden. Ich habe sodann die in der vorigen Tabelle angegebenen Fallzeiten auf 135 cm Fallhöhe in Fallgeschwindigkeiten pro Sekunde umgerechnet und es ergaben sich so aus dem Vergleich mit der berechneten Fallgeschwindigkeit die Leistungsgrössen auf die ersten 135 cm Fallhöhe. Ausserdem habe ich aus einer grösseren Reihe von Fallversuchen auf 6 m Fallhöhe die für jedes Modell erlangten grössten Fallzeiten ebenso umgerechnet und daraus die Leistungsgrössen für den Gesammtfallraum von 6 m erlangt. Die Differenz der Fallzeiten zwischen denjenigen für 135 cm und 600 cm ergab die Fallzeiten und Leistungsgrössen während des unteren, 465 cm Höhe betragenden Fallraumes resp. der entsprechenden Bahnen. Die Resultate dieser Versuche und Berechnungen finden sich in folgender VI. Tabelle, welche einen Nachtrag zur V. darstellt. Lg bedeutet darin Leistungsgrösse, Z die beobachtete Fallzeit in Sekunden, V die auf die Sekunde umgerechnete beobachtete Fallgeschwindigkeit in Centimetern.

VI.

Modell	Gesammtfallraum von 600 cm			Erste 135 cm			Letzte 465 cm		
	Z	V	Lg	Z	V	Lg	Z	V	Lg
$\frac{1}{1}$	6,4	93,7	1,32	1,4	96,4	1,28	5,0	93	1,33
$\frac{2}{1}$	8	75	1,65	1,8	75	1,65	6,2	75	1,65
$\frac{3}{1}$	8,4	71,4	1,73	1,95	69,2	1,82	6,45	72	1,72
$\frac{4}{1}$	9	66,6	1,86	2,1	64,3	1,86	6,9	67,4	1,83
$\frac{5}{1}$	9,2	65,2	1,9	2,2	61,3	2,02	7,0	66,4	1,86
$\frac{6}{1}$	9,8	61,2	2,02	2,2	61,3	2,02	7,6	61,6	2,02
$\frac{7}{1}$	6,4	63,8	1,94	2,2	61,3	2,02	7,2	63,7	1,94
$\frac{8}{1}$	9,6	62,5	1,98	2,2	61,3	2,02	7,4	62,8	1,97
$\frac{9}{1}$	9,6	62,5	1,98	2,2	61,3	2,02	7,4	62,8	1,97
$\frac{10}{1}$	8,8	86,2	1,81	2,1	64,3	1,86	6,7	69,4	1,78

Die Zahlen vorstehender Tabelle belegen einen Theil des im Abschnitte über die Leistungsgrösse des Typus bereits gesagten. Auffallend ist hier die hohe Leistungsfähigkeit des Modells $\frac{6}{1}$ während seiner Gesammtbahn durch 6 m Fallhöhe. Es ist das einzige, welches auch während seines unteren Bahnstückes mit seiner Leistungsgrösse über 2 sich erhielt. Es schlug dabei übrigens eine, in der Horizontalprojektion relativ geradlinige Bahn ein, wogegen die anderen, ihm nächststehenden Modelle bei höheren Fallräumen immer stärker gekrümmte Bahnen erzeugten.

c. Die spiralige Bahn.

Ganz homogene und symmetrische Modelle erzeugen in der Horizontalprojektion geradlinige Bahnen ihres Schwer-

punktes, wie wir bisher gesehen haben, wenn man sie in genau horizontaler Stellung ihrer Längsaxe in Rotation versetzt. Die Längsaxe erhält sich dabei dauernd in horizontaler Lage.

Bei weitem die meisten Modelle und noch viel mehr die natürlichen Organe des Typus sind aber nicht ganz homogen und symmetrisch. In diesen Fällen weicht die Bahn des Schwerpunktes in Horizontalprojektion mehr oder weniger von der geraden Linie ab, wenn nicht diese Unregelmässigkeiten sich gegenseitig kompensiren, wie es hier und da, sogar bei auffallend starker Unsymmetrie (z. B. bei Ailanthusfrüchten) vorkommt. Es ist dies jedoch selten. In der ungeheueren Mehrzahl der Fälle werden in Folge dessen krummlinige Bahnen und zwar nach abwärts sich verengernde und steiler werdende Spiralbahnen beschrieben, wobei bis zu einem gewissen Grade zunehmende Neigung der Längsaxe der Organe eintritt. (Vgl. Fig. 2—4 Taf. VI). Es sind hier wesentlich zwei Fälle, die aber im äusseren Verhalten ganz übereinstimmen, zu unterscheiden: 1. Die Systeme sind homogen aber unsymmetrisch. 2. Sie sind symmetrisch aber nicht homogen.

1. Die Spiralbahn homogener unsymmetrischer Systeme. Die resultirende Gesammtbahn eines solchen Systems, dessen eines Ende beispielsweise etwas breiter sei als das andere, so dass der Schwerpunkt etwas näher dem breiten Ende sich befindet, entsteht zunächst aus folgenden zwei Einzelvorgängen: Erstens aus der bereits eingehend erörterten, beschleunigten Rotation, um die Längsaxe und zweitens aus einer, in der jeweiligen Richtung der Horizontalprojektion der Längsaxe stattfindenden, geradlinig fortschreitenden Bewegung. Letztere ist nach der Seite des sich gleichzeitig abwärts neigenden schmäleren Plattenendes zu gerichtet.

Bei der ersten dieser beiden Bewegungen gesellt sich langsame, doch anfangs etwas zunehmende, horizontale Drehung des Systems zu dem, hier eine krummlinige Bahn des Schwerpunktes erzeugenden horizontalen Fortschreiten desselben. Die breitere Plattenhälfte muss bei gleicher Rotationsgeschwindigkeit rascher fortschreiten wie die schmälere

Hälfte. Wir können die so erzeugte resultirende Bewegung des Schwerpunktes in zwei zu einander rechtwinklige geradlinige Komponenten und eine Horizontalrotation um eine im Raume senkrechte Schwerpunktsaxe zerlegen.

Wäre bei diesem Vorgange dauernd horizontale Stellung der Längsaxe möglich, so würde die Grösse der horizontalen Widerstandskomponenten, resp. deren Unterschied auf den beiden ungleichbreiten Hälften allein den Verlauf der erzeugten Schwerpunktsbahn bedingen. Allein wie die breitere Hälfte des Systems in horizontaler Richtung rascher voranschreitet als die schmälere, so muss sie auch in vertikaler Richtung den Luftwiderstand stärker ausnützen. Sie sinkt in Folge dessen weniger rasch abwärts als die erstere und die Längsaxe neigt sich somit zum Horizont.

In Folge dieser Neigung entsteht dann die als zweite bereits genannte komponente Einzelbewegung. Dieselbe ist eine horizontal projizirt geradlinig fortschreitende Bewegung in der jeweiligen Richtung der Horizontalprojektion der Längsaxe und wächst mit der Zunahme der Neigung dieser Axe bis zu einem gewissen Grade. Diese Bewegung summirt sich zu der gleichgerichteten Komponente der ersten Bewegung und erhöht dieselbe dadurch bedeutend. So entsteht eine höchst verwickelte Bahnkurve, zu deren Gesammtrichtung, resp. zu deren einzelnen Elementen sich aber nun die Richtung der Längsaxe nicht mehr senkrecht, sondern in zunehmend schiefem Winkel einstellt, wie aus der Fig. 4 Taf. VI zu ersehen ist. Dieselbe stellt schematisch ein Stück aus dem Anfang einer solchen Spiralbahn in Horizontalprojektion dar und es sind darin der Vereinfachung halber die in die Richtung der Längsaxe fallenden Komponenten aus den beiden Einzelbewegungen bereits summirt gedacht. Die Bahn des Schwerpunktes wird durch die Punkte s s_1 s_2 . . . bezeichnet. Die Längsdimension der Platte ist dabei zunehmend verkürzt dargestellt, entsprechend der zunehmenden Neigung der Längsaxe.

Im Grunde ist aber die Bahn durch die bisher gegebenen Momente noch nicht ganz bestimmt, sondern es gesellen sich noch zwei weitere Beeinflussungen hinzu, welche behufs genauerer Kenntniss ebenfalls berücksichtigt werden müssen.

Zunächst muss nämlich mit zunehmender Steilheit der Axenneigung in Folge des erleichterten Luftabflusses und verringerter Horizontalprojektion das statische Moment der vertikal drehenden Kräfte und damit die Rotationsgeschwindigkeit selbst wieder etwas abnehmen. Ausserdem kommt noch der Einfluss der Stabilität der Rotationsaxe auf die Grösse der Axenneigung bei der grossen Rotationsgeschwindigkeit als nicht ganz unwesentlich in Betracht. Dieser Einfluss muss sich, wie ich weiter unten zeigen werde, in verstärkter Neigung der Längsaxe zur Horizontalen und gleichzeitig in Horizontalprojektion in zunehmender Schiefe ihrer Winkelstellung zur Bahnlinie äussern.

Alle diese einzelnen wirksamen Kräfte werden sich schliesslich einem Gleichgewichtszustande nähern und die Bewegung des Schwerpunktes wird den Charakter einer zunehmend gleichförmigeren Schraubenbewegung annehmen. Nach den Ausführungen im allgemeinen Theile dürfen wir indess schliessen, dass sie nie ganz gleichförmig werden kann, sondern sich einer gleichförmigen Schraubenbewegung asymptotisch nähern muss.

2. Die Spiralbahn symmetrischer inhomogener Systeme. Der Verlauf der Bewegung ist im ganzen der gleiche wie oben, nur neigt sich hier die schwere Hälfte nach abwärts und vorwärts. Die schwerere Hälfte setzt hier den senkrecht wie horizontal wirkenden Komponenten des Luftwiderstandes einen grösseren Trägheitswiderstand entgegen. Abgesehen von diesem Unterschiede sind alle übrigen wirksamen Faktoren gleich, so dass ich nicht mehr weiter auf den Einzelverlauf eingehen will. —

Es bleibt uns schliesslich noch die Art der Wirkung der bedeutenden Zentrifugalkräfte zu untersuchen, welche bei der sehr beschleunigten Drehung um die Längsaxe, welche die stabilste Hauptträgheitsaxe darstellt, entstehen. Dieselben wachsen bei den relativ stärker verlängerten Platten mit der Verlängerung und äussern sich in dem wachsenden Bestreben der Erhaltung der Rotationsebene, also der zunehmenden Stabilität der Drehaxe. Diese Stabilität verursacht, wenn äussere Kräfte auf das drehende System einwirken, welche es aus seiner zu sich selbst parallelen Lage zu ver-

schieben streben, Axenneigungen, welche aber nur bei homogenen und symmetrischen Systemen (deutlich) zur Wirkung kommen. Bei inhomogenen oder unsymmetrischen Systemen dagegen durch das bedeutende Ueberwiegen der übrigen wirksamen Kräfte ganz zurücktreten. In diesem Falle wirkt die Stabilität je nach der Richtung und Grösse der horizontalen und vertikalen Komponenten ihres Kraftmomentes nur etwas hemmend oder verstärkend.

Die aus der Stabilität resultirende Wirkung lässt sich somit sichtbar nicht von dem übrigen Vorgang trennen, allein wir müssen theoretisch auf sie schliessen. Ein absoluter Beweis für sie wäre in vorliegendem Falle nur quantitativ möglich, durch Berechnung der Momentgrösse aller einzelnen angreifenden Kräfte und Vergleich mit der Grösse des erzielten Resultates. Diese Aufgabe ist indess ganz ausserordentlich schwierig, ja so gut wie unlösbar. Wir müssen uns in Folge dessen mit der Annahme der mechanischen Nothwendigkeit der zu beschreibenden Vorgänge begnügen.*)

Denken wir uns zunächst durch den Schwerpunkt eines solchen, im Beginn seiner Drehung um die horizontale Längsaxe und in horizontalprojizirt geradliniger Bewegung (in der Richtung des Pfeiles S) befindlichen Apparates ABCD (Fig. 5 Taf. VI) ein rechtwinkeliges Koordinatensystem gelegt. Die Rotationsaxe $+z-z$ falle mit der senkrecht zur Papierfläche gedachten Axe $+3-3$ zusammen, welche perspektivisch dargestellt ist. Die beiden anderen Koordinatenaxen, von welchen die ξAxe im Raum senkrecht steht, fallen somit in die Ebene des Papiers selbst. In dieselbe Ebene falle momentan die fortschreitende Bewegung des Schwerpunktes, also auch der Pfeil S.

Es wirke nun zunächst die Schwerkraft stärker auf das belastete Ende des Apparates ein, welches dem mit $+z$ bezeichneten Axenende der Figur entspricht, oder was dasselbe bedeutet, der nach aufwärts gerichtete Luftwiderstand wirke

*) Ich verweise in Bezug auf das Prinzip der Combination der Wirkungen verschiedener drehender Kräfte auf das Kapitel der spiraligen Bahn bei der XII. Gruppe der Flugorgane, wo sehr interessante Drehungsverhältnisse vorkommen, welche sich eng an diejenigen beim Kreisel anschliessen.

stärker auf das Axenende $-z$ ein. Indem sie als Zug auf das Axenende $+z$ wirkt, wirkt sie als drehende Kraft um die horizontale Queraxe ψ. Die stabile Axe z widersteht aber diesem Zug nach dem Gesetz der Erhaltung der Rotationsebène entsprechend der Grösse der Amplitude der um sie stattfindenden Rotation. Die beiden Drehungen kombiniren sich nunmehr entsprechend ihrer Winkelgeschwindigkeit nach dem Parallelogramm der Rotationen und erzeugen eine resultirende Drehung, deren Momentanaxe in der Ebene der beiden komponenten Axen sich befindet. Da die Rotation vom Schwerpunkt aus betrachtet um die Axenenden $+3$ und $+\psi$ gleichsinnig verläuft, so liegt die resultirende Momentanaxe m in dem von $+\psi$ und $+3$ eingeschlossenen Winkel und ihrem zugehörigen Scheitelwinkel und zwar, entsprechend der grösseren Winkelgeschwindigkeit der z Axe nahe bei 3. Anfangs ist die Amplitude des Ausschlages zwischen 3 und m unendlich klein, steigert sich aber fortwährend und die stabile Hauptträgheitsaxe z rückt letzterer beständig nach, indem sie dieselbe fortwährend in einer wellenförmigen Kurve, einer Poinsot'schen Poloide umkreist. Damit findet aber eine thatsächliche horizontale Drehung des Apparates um die im Raume senkrechte ξ Axe statt. Die z Axe rückt in die Stellung der m Axe ein.

Bei der ursprünglichen, zur Längsaxe rechtwinklig fortschreitenden Bewegung hält in horizontaler Richtung der Luftwiderstand sich beiderseits das Gleichgewicht, sobald aber schiefe Stellung eintritt überwiegt der Widerstand auf der voranschreitenden Hälfte, in Folge dessen wirkt er als drehende Kraft und zwar nunmehr um die vertikale ξ Axe (vgl. Fig. 6 Taf. VI, in welcher alles ganz gleich ist, wie in Fig. 5, bis auf den einzigen Unterschied, dass die Längsaxe des Systems aus der 3 Axe in die Stellung der Momentanaxe m der vorigen Figur eingerückt ist). Die resultirende Axe m verläuft also hier zwischen den komponenten Axen in dem von $+\xi$ und $-m$ gebildeten Winkel und dessen Scheitelwinkel und zwar auch hier wieder nahe bei der z Axe. Auch hier rückt die stabile z Axe wiederum in die Stellung von m_1 nach und so entsteht eine resultirende senkrechte Rotation um die horizontale Queraxe.

Die beiden Einzeldrehungen um die ξ- und ψ Axe verlaufen in Wirklichkeit untrennbar verbunden und mit dem Eintreten der stabilen z Axe in die Stellung der Momentanaxe m_1 ist in einem gegebenen Moment die gesammtresultirende Axenlage erreicht.

Die Stabilität der Längsaxe strebt also in Folge der äusseren Drehkräfte eine Abwärts- und Vorwärtsneigung des schwereren Endes des Systems herbeizuführen. Nachdem die Schwere ohnehin mit überwiegendem Kraftmoment gleichsinnig mit der vertikalen Komponente wirkt, so summiren sich die Momente der beiden vertikal wirkenden Drehkräfte und die Neigung der Längsaxe zum Horizont wächst dem entsprechend. Anders aber verhält es sich mit den horizontalen Komponenten der beiden wirksamen Drehkräfte. Diese wirken einander gegensinnig. Die horizontale Komponente des Luftwiderstandes strebt die leichtere Hälfte des Systems nach vorwärts zu drehen, während die aus der Stabilität entspringenden horizontalen Drehkräfte diese Hälfte rückwärts zu drehen suchen. Das Moment der ersteren Drehkraft muss aber überwiegen, in Folge dessen wird thatsächlich eine Vorwärtsdrehung ausgeführt, deren Amplitude der Differenz der beiden Momente entspricht.

Bei etwas stärkerer Belastung des einen Endes, welche eine Verschiebung des Schwerpunktes um nur $^1/_{14}$ der ganzen Länge beträgt, so dass die Flächen beiderseits der Schwerpunktsqueraxe sich wie 3 : 4 verhalten, wird die Spirale so steil, dass ihre Axe bis dicht an das abwärts geneigte und belastete Ende heranrückt. Es bilden solche Formen bereits einen Uebergang zu dem XI. Typus der Flugorgane und hier macht sich auch bereits die grössere Ungleichheit in der Wirkung der horizontalen Komponenten des Luftwiderstandes auf die beiden Längshälften der Platte stark geltend. Die Rotation um die im Raume senkrechte Axe der Bahn beschleunigt sich nämlich bedeutend und bei noch weiterer Verlegung des Schwerpunktes fängt die Längsaxe so gar an, sich in Folge der erzeugten Zentrifugalkraft wieder mehr horizontal zu stellen.

Die vom Schwerpunkte eines seine Längsaxe neigenden Systems beschriebene Bahn stellt eine höchst kompli-

zirte Kurve dar. In der Vertikalprojektion verläuft sie, bei Vernachlässigung der sekundären Kurven, aus steilerer Neigung unter anfangs abnehmendem Winkel zum Horizont, dann nimmt der Neigungswinkel aber allmählig wieder zu und die Richtung geht schliesslich in eine, annähernd gleichförmige, unter gleichem Winkel zur Horizontalen geneigte über.

Diese Hauptrichtung der Bahn wird jedoch, wie wir gesehen haben, nicht in einfach gekrümmter Linie zurückgelegt, sondern der Schwerpunkt beschreibt, bald über bald unter einer, die Hauptrichtung anzeigenden Linie mit jeder halben Drehung eine kleine sekundäre Kurve. Diese Kurven werden mit zunehmender Drehgeschwindigkeit immer kleiner und flacher. In der Horizontalprojektion verläuft die Bahn entweder anfangs Sförmig gekrümmt und dann als sich verengernde Spirale, welche schliesslich in einen Kreis übergeht oder gleich von Anfang an einfach spiralig. Schliesslich wird sie kreisförmig. Dieselbe stellt anfangs eine einfache Linie dar, sobald jedoch Neigung der Längsaxe eintritt, treten auch in der Horizontalprojektion die kleinen, mit jeder halben Umdrehung korrespondirenden Sekundärkurven auf und deren Krümmungsradius wächst bis zu der schliesslich erzeugten Kreislinie, wo sie ihr Maximum erreichen, welches von der Grösse des Neigungswinkels der Längsaxe abhängt.

Ausser dieser relativ einfachsten Bahn, welche der Schwerpunkt allein zurücklegt, machen die übrigen Punkte eines solchen Systems aber noch weitere höchst verwickelte Bewegungen. Sie beschreiben Cycloidenlinien, welche der in doppeltem Sinne gekrümmten Bahn folgen. Dieselben entstehen durch die Rotation um die gleichzeitig sich neigende Längsaxe. Die Punkte der letzteren selbst endlich beschreiben wellenförmige Poloiden um die Momentanaxe, welche aus den beiden Drehungen um die Längs- und Queraxe resultirt.

Die scheinbar gleichförmige schliessliche Zylinderschraubenbewegung des Schwerpunktes kann dabei in Wirklichkeit keine solche sein, sondern sie verläuft in dem Mantel eines Rotationskörpers, welcher mit einem sich ins unendliche verlängernden, annähernd hyperbolischen oder parabo-

lischen Kurvenaste beschrieben gedacht ist. Der beschreibende Kurvenast würde sich dabei um eine, zur Asymptote der Hyperbel oder zur Parabelaxe parallelen, ausserhalb der Kurve verlaufenden lothrechten Axe zu bewegen haben. Die Bewegung nähert sich also asymptotisch dem Charakter einer wirklichen gleichförmigen Zylinderschraubenbewegung ohne ihn jemals zu erlangen. Es geht dies hervor aus dem im allgemeinen Theile erörterten Charakter der Bewegung eines Punktes oder Körpers, welcher unter der Einwirkung der beiden Beschleunigungen der Schwere und des Luftwiderstandes steht.

Rückblick.

Der nächste Grund der charakteristischen Bewegung länglicher Platten mit zentralem Schwerpunkt ist also der Mangel einer stabilen Gleichgewichtsstellung während des Falles. Am wenigsten stabil ist aber das Gleichgewicht in Bezug auf die Längsaxe, in Folge dessen treten am leichtesten Drehungen um diese Axe ein. Die Drehungen beschleunigen sich in Folge der während der Drehung stattfindenden Aenderung der Bewegungsrichtung, welche eine zeitlich verlängerte Wirkung der drehenden Kräfte des Luftwiderstandes gestatten, so sehr, dass mit Hülfe der momentanen Verlegung der Drehaxe der sehr bedeutende Luftwiderstand überwunden wird, welcher sich einer vollen halben Umdrehung entgegensetzt. Gleichzeitig entsteht durch die zunehmend beschleunigte, sehr rasche vertikale Rotation ein ununterbrochener Luftwirbel, welcher unterhalb der drehenden Platte Verdichtung, oberhalb derselben Verdünnung der Luft erzeugt und so zunehmende Fallverlangsamung bedingt. Durch die überwiegend gleichsinnig wirksamen horizontalen Widerstandskomponenten während der Schieflagen der Platten entsteht die starke Abweichung der Bahn von der senkrechten Richtung. Bei gleicher Flächengrösse der Platten und gleichem Gewicht entscheidet, so lange die Platten nicht zu schmal werden, bei wechselnder Gestalt das Verhältniss

der statischen Momente und des Trägheitsmomentes über die Geschwindigkeit der Rotation und damit der Leistungsfähigkeit in Ausnützung des Luftwiderstandes. Aehnlich verhält es sich bis zu einem gewissen Grade bei zunehmender Verschmälerung gleichlanger Platten. Plattenvergrösserung bei gleichbleibendem Dimensionsverhältniss und ebenso bei zunehmender Länge und gleichbleibender Breite steigern die Leistungsfähigkeit, wenn auf die Flächeneinheit die gleiche Masse kommt. Geringe Assymmetrie oder Inhomogenität erzeugen in horizontaler wie in vertikaler Richtung ungleiches Fortschreiten der beiden Plattenhälften und dadurch Schiefstellungen der Platten zum Horizont und zu der, eine spiralige Gestalt annehmenden Bahn des Schwerpunktes. Die Fallgeschwindigkeit wird durch diese Schiefstellungen vermehrt, doch erhält sie sich gleichwohl noch unter der aus Gewicht und Fläche berechneten theoretischen.

Zusätze zum IX. Haupttypus.

1. Bei Gelegenheit der Ausführungen über die Gründe der rascheren Rotation und wachsenden Leistungsfähigkeit von Platten gleichen Flächeninhaltes, deren Länge im Verhältniss zur Breite wächst (s. Tab. V S. 168 u. 169), habe ich, um den Text nicht allzu sehr mit mathematischen Ausführungen zu belasten, die Grösse des Luftwiderstandes, welchen die verschiedenen Platten während ihrer Rotation erfahren, nicht berücksichtigt.

Ich hatte gezeigt, dass mit sich ändernder Längen- und Breitendimension das Verhältniss von statischem Moment und Trägheitsmoment ein anderes wird und dass die verschiedene Rotationsgeschwindigkeit Folge dieses sich ändernden Verhältnisses ist. Nachdem hier weitere wirksame Kräfte nicht vorhanden sind, so kann nur die grössere Rotationsgeschwindigkeit, die bis zu einer gewissen Grenze wachsende Leistungsgrösse bedingen.

Absolut genommen findet selbstverständlich keine Vermehrung der lebendigen Kraft statt. Mehr Arbeit als dem Masse des Gewichtes, also der wirksamen Kraft entspricht, kann überhaupt nicht geleistet werden. Nur die Grösse der in einer bestimmten Richtung zur Bewegung erzeugten lebendigen Kraft der drehenden Masse wächst. Der zu überwindende Widerstand wird auf beiden Seiten des drehenden Systems ungleich und zwar überwiegt derjenige, welcher gegen die Abwärtsdrehung gerichtet ist.

Wenn das Verhalten des Luftwiderstandes ein einfacheres wäre, so müsste sich nach dem Gesetze der Erhaltung der Kraft durch Rech-

nung nachweisen lassen, dass bei gleichem Gewicht eines frei fallenden Körpers die Summe aller überwundenen Widerstände die gleiche bleibt, in welcher Art immer die Bewegung vor sich geht.

Im vorliegenden Falle ist aber die Sache im allerhöchsten Grade verwickelt und an eine wirklich genaue Berechnung der absoluten Widerstandsgrösse, respektive deren einzelner Komponenten nicht zu denken. Es spielen hier Kompressionsverhältnisse der auftreffenden Luftstrahlen, welche namentlich durch die grössere oder geringere Möglichkeit des seitlichen Abströmens bedingt sind, eine überaus wichtige Rolle. Sehr charakteristisch dafür ist die auffallende Leistungssteigerung gleichbreiter aber stärker verlängerter Platten.

Indessen liegt nach dem bisherigen der Schluss nahe, dass Platten von verschiedener Gestalt, welche sich in ruhiger Luft um eine, in der Richtung ihrer Längsaxe angebrachte feste Axe mit der gleichen Geschwindigkeit, wie beim freien Fall drehen, bei gleichgrosser Fläche nahekommende Grössen des Widerstandes und ein einfaches Verhältniss derselben ergeben dürften. Der so erzeugte Widerstand ist annähernd berechenbar und wäre durch einen direkten Versuch zu kontroliren, indem man das Gewicht experimentell feststellen könnte, welches nöthig ist, eine derartige Platte mit bestimmter Geschwindigkeit zu drehen (mittelst eines, an dem Gewicht befestigten und um die Axe resp. um eine an dieser angebrachte Rolle gewickelten Fadens). Man könnte dann dem wirklichen Vorgang noch näher kommen und das nothwendige Gewicht für die gleiche Rotationsgeschwindigkeit in einem horizontalen Luftstrom, welcher dieselbe Geschwindigkeit, wie die fortschreitende Bewegung besitzt, feststellen. Würde man dann den gleichen Versuch mit senkrecht stehender Drehaxe machen und diese selbst so beweglich stellen, so dass sie sich leicht rechtwinkelig zu der Richtung des Luftstromes und zu sich selbst verschieben könnte, so müsste bei hinreichend rascher Rotation ein Ausweichen nach der Seite stattfinden, auf welcher die Platte sich im Sinne des Luftstromes dreht.

Zu der Grösse des statischen Momentes muss der Widerstand, welcher sich gegen die Drehbewegung geltend macht, in einem relativ einfachen direkten Verhältnisse stehen, denn beide hängen bei gleichem Gewicht und gleichgrosser Fläche von den nämlichen Bedingungen, nämlich der Gestalt der Platte ab.

Im Uebrigen schwankt, trotz der an sich nicht unbedeutenden Winkelgeschwindigkeit der Drehungen, die lineare Geschwindigkeit der vom Luftwiderstand getroffenen Flächenelemente zwischen so mässigen Grenzen, dass man, behufs Berechnung so gut wie bei den Fallversuchen mit nicht drehenden Körpern das quadratische Widerstandsgesetz anwenden kann.

Behufs eines solchen Versuches habe ich zuerst aus den in der Tabelle angegebenen Umdrehungszahlen zunächst die lineare Geschwindigkeit von Flächentheilchen eines bestimmten Radius (= 1 mm) berechnet und daraus den Widerstand, welchen sie in der Luft erleiden. Für den Gesammtwiderstand wurde dann die Differenzialsumme aller Wider-

derstände zwischen dem kleinsten und grössten Radius berechnet. Als Beispiel dieser Berechnung führe ich die Platte $^3/_1$ an. Dieselbe besass ein Verhältniss von Länge zur Breite wie 48,99 zu 16,32 (in mm) und durchfiel 135 cm Fallhöhe in 1,95 Sekunden. Der Geschwindigkeitsunterschied während der einzelnen Strecken dieser Fallhöhe ist, wie aus dem Charakter der Bahn erhellt, und aus vielen Fallversuchen hervorging, so gering, dass er mittelst der angewendeten Methode nicht mehr festgestellt werden konnte. Wir können in Folge dessen gleichförmige Fallgeschwindigkeit annehmen. Diese Annahme beeinflusst das Resultat der ohnehin nur approximativen Berechnung in relativ geringem Maasse.

Nach den, in der Anmerkung Seite 168 gemachten Angaben über die Rotationsgeschwindigkeit dieser Platte wurden während der letzten 99 cm Fallhöhe, also in 1,42 Sek. mindestens $16\frac{1}{2}$ Umdrehungen gemacht. Die Zahl der Umdrehungen während 1 Sek. betrug also $\frac{16{,}5}{1{,}42} = 11{,}62$.

Berechnen wir hieraus die lineare Geschwindigkeit v eines 1 qmm grossen Flächentheilchens, welches wir uns als der Rotationsaxe paralleles schmales Streifchen von 1 mm Abstand von dieser Axe (z) denken, so erhalten wir dieselbe aus der Peripherie eines Kreises von 1 mm Radius, multiplizirt mit der Umdrehungszahl $= \pi \cdot 11{,}63 = 73$ mm.

Die Grösse des Luftwiderstandes für eine solche Geschwindigkeit ergibt sich aus unserer Widerstandsformel zu

$$w = 0{,}001293 \cdot \frac{73^2}{19620} = 0{,}00035119 \text{ mgm}$$

für den Fall, dass wir die Richtung der auftreffenden Luftstrahlen als senkrecht annehmen und die Unterschiede zwischen den Randpartieen und den inneren Theilen der Fläche vernachlässigen.

Denken wir uns eine, um ihre in fester Lage befindliche horizontale Schwerpunktslängsaxe rotirende Platte, so wird der Luftwiderstand die eine Hälfte auf der vorderen, die andere Hälfte auf der rückwärtigen Plattenseite treffen. Der Widerstand, welchen eine Fläche in der Luft erleidet, hängt von der relativen Geschwindigkeit derselben zur Luft ab, also bei drehenden Körpern von der linearen Geschwindigkeit derselben. Diese wächst aber in einfachem Verhältniss mit der Grösse des Radius. Nachdem nun der Luftwiderstand mit dem Quadrat der Geschwindigkeit wächst, so wächst er bei einer drehenden Fläche mit dem Quadrate des Radius der getroffenen Flächentheilchen.

Ein Flächentheilchen vom Radius 1 habe die Geschwindigkeit v. Der Widerstand, welchen dasselbe erfährt, wird in Folge dessen die Grösse $m v^2$ haben, in welchem Ausdruck m eine beliebige Konstante bedeuten soll.

Ein Flächentheilchen, dessen Radius x und dessen lineare Geschwindigkeit in Folge dessen xv ist, erleidet demnach den Widerstand $m x^2 v^2$.

Die Summe der Widerstände der verschiedenen Flächentheilchen

für alle Grössen des Radius x zwischen o und r (wenn wir die halbe Breite der Platte r nennen) ist demnach

$$W = \int_0^r m x^2 v^2 \, dx = m v^2 \int_0^r x^2 \, dx = m v^2 \frac{r^3}{3}$$

Fügen wir in den Ausdruck rechts noch die Grösse l als Mass der Plattenlänge ein, und ersetzen die halbe Plattenlänge r durch die ganze = R, sowie $m v^2$ durch den Buchstaben w, so bekommen wir schliesslich die Gleichung

$$W = w \frac{l R^3}{12}$$

welche das Maass des Gesammtwiderstandes der in andauernd ruhiger Luft mit der angegebenen Geschwindigkeit sich drehenden Platte $\frac{3}{1}$ in mgm angibt. Der Gesammtwiderstand berechnet sich hieraus zu 3,116 mgm.

Ebenso habe ich für die 3 übrigen Platten $\frac{1}{1}$, $\frac{6}{1}$ und $\frac{9}{1}$ die Berechnung vorgenommen. Indessen stimmte das Resultat, wie auch von vornherein bei der Ungenauigkeit der Umdrehungszahlen zu erwarten war, nicht mit dem theoretisch zu erwartenden. Ich führe dasselbe daher auch nicht weiter an und erwähne nur, dass der Gesammtwiderstand der Platte $\frac{1}{1}$ (welche nicht 10 halbe Umdrehungen machte, wie irrthümlich in der Tabelle Seite 169 steht, sondern $14\frac{1}{2}$, wovon 8,62 = 4,31 ganze Umdrehungen auf die letzten 69 cm Fallhöhe = 0,715 Sek. Fallzeit kamen) sich in der Grösse W = 5,043 mgm ergab. Die angegebene Umdrehungszahl kommt der wirklichen grössten Umdrehungsgeschwindigkeit übrigens sehr viel näher als bei der Platte $\frac{3}{1}$. Die Platte $\frac{9}{1}$ ergab wiederum nahe das gleiche Resultat wie die Platte $\frac{3}{1}$.

Abgesehen davon, dass die eingehendere Verfolgung dieser Bewegung mittelst der oben angedeuteten Versuche über die hier gesteckten Grenzen hinausgeht, wäre es mir auch mangels der nöthigen Hülfsmittel nicht möglich gewesen, dieselben zu unternehmen.

2. Zur Gestalt der vertikalen Längsprojektion der Schwerpunktsbahnen der Platten $\frac{1}{1}$, $\frac{2}{1}$, $\frac{3}{1}$ und $\frac{6}{1}$ welche Taf. V Fig. 7 in ihrem Verlaufe dargestellt sind, bemerke ich nachträglich folgendes: Eine ganz exakte Aufnahme ist mittelst der von mir angewendeten Fallversuche aus verschiedenen Höhen nicht möglich. Die dargestellten Kurven sind also, abgesehen von der vollständigen Ausserachtlassung der sekundären Kurven nur als annähernd richtig zu betrachten. In ihrem unteren Stück, von dem Punkte der stärksten Krümmung an, nähern sie sich am mei-

sten der Gestalt eines Hyperbelastes. Ich habe einen Versuch gemacht die Gleichung der Hyperbel $\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1$ darauf anzuwenden, doch lässt sich eine dieser Gleichung entsprechende Gesetzmässigkeit des Verlaufes nicht hinreichend sicher feststellen.

Nichtsdestoweniger ist an dem asymptotischen Verhalten dieses unteren Kurvenastes nicht zu zweifeln, wie schon aus dem Wesen der die Kurve erzeugenden Elemente hervorgeht.

X. Haupttypus.

Die länglich plattenförmigen Flugorgane mit einer belasteten Längskante.

(Taf. I, Fig. X, 1—3; Taf. III, Fig. 3, 4 u. 5; vgl. Fig.-Erkl.)

Die Organe stellen sehr dünne Platten von länglichem Umriss mit längs medianem, dagegen in der Richtung der Queraxe stark verschobenem Schwerpunkte dar. Sie bestehen aus einer flach zusammengedrückten Nuss, welche von einem dünnhäutigen, länglichen Flügel in der Weise umzogen ist, dass sich erstere in der Mitte der einen Längskante und zwar dicht an ihrem Rande befindet. Der Flügel ist eben oder in Quer- und Längsrichtung konkavkonvex gekrümmt. Die Organe besitzen beim Fall in ruhiger Luft typisch Gleichgewichtslage in Bezug auf ihre beiden Flächenaxen und zwar stellen sie sich mit ihrer Längsaxe horizontal und mit ihrer Queraxe in einen, der Verschiebung des Schwerpunktes entsprechenden, spitzen Winkel zur Horizontalen. Die Bahn des Schwerpunktes in ruhiger Luft weicht bedeutend von der lothrechten ab und wäre in der Vertikalprojektion typisch eine Kurve von anfangs zunehmender, dann wieder abnehmender Krümmung, welche einen beständig abnehmenden, spitzen Winkel mit der Horizontalen macht und sich schliesslich einer geraden Linie nähert. Durch Oszillationsbewegungen um die Gleichgewichtslage entsteht jedoch in Wirklichkeit eine Bahnlinie, welche wenigstens anfangs aus Sekundärkurven zusammengesetzt erscheint. In der Horizontalprojektion würde die Bahn typisch eine gerade Linie darstellen, indess ist sie in Folge fast ausnahmslos

vorhandener Unsymmetrieen meist gekrümmt. Im Allgemeinen stellt sie eine, nach unten sich verengernde, spiralige Raumkurve dar. Die Fallgeschwindigkeit entspricht bei rasch eintretender Gleichgewichtslage von Organen mit ganz flachem Flügel annähernd der theoretischen für die grösste Projektionsfläche der Organe, bei schwach konkavkonvexer Krümmung in der Querrichtung vermindert sie sich dagegen in Folge fortgesetzter Oszillationen um die Gleichgewichtslage, welche erhöhte Ausnützung des Luftwiderstandes gestatten, bedeutend.

Beispiele bilden vor allem die Samen vieler Bignoniaceen-Arten, wie z. B. diejenigen von Tectona australis, Calosanthes indica, Bignonia cyrtantha, echinata, muricata u. a. Ferner die Samen einiger Ternstroemiaceen (Kielmeyeria, Mahurea) und endlich diejenigen der Cucurbitaceen-Gattung Zanonia.

Der Schwerpunkt der Organe fällt meist mehr oder weniger in die Mitte der Nuss, was beiläufig einem Drittel bis einem Viertel der Länge der Queraxe zu entsprechen pflegt.

Drehungen spielen bei der Funktion der hierhergehörigen Organe nur als Einstellungsdrehungen oder vielmehr -schwankungen eine Rolle bei der Ausnützung des Luftwiderstandes. Dieselben besitzen nur einen geringen Winkelausschlag und gehen ziemlich langsam vor sich. Ganze Umdrehungen kommen zwar vor um eine, im Raume vertikale, ausserhalb der Organe gelegene Axe, doch gehen sie sehr langsam vor sich und haben für die Ausnützung des Luftwiderstandes keine Bedeutung. Sie sind nicht typisch, doch ganz allgemein verbreitet.

Samen von Bignonia echinata (Bignoniac.).

Das sehr reichlich vorhandene Material stammt aus im Münchener Staatsherbarium unter obigem Namen aufbewahrten, von Martius in Brasilien gesammelten, anscheinend reifen Früchten (anderwärts als B. mucronata bezeichnet).

Fig. 3 Taf. III stellt einen wohlentwickelten Samen in natürlicher Grösse als typisches Beispiel dar. Abgesehen von im ganzen unwesentlichen Unterschieden gleichen sich die einzelnen Individuen sehr. Der Umriss schwankt in sofern ein wenig, als die beiderseitigen Enden häufig etwas mehr abgerundet oder auch verschmälert sind. Manchmal sind sie auch in der Grösse, sowohl in der Länge als Breite, mehr oder weniger ungleich.

Die ganz flach gedrückte Nuss des Samens befindet sich innerhalb eines polygonalen Feldes in der Mitte der einen Längskante (Vorderkante) des länglichen Organs und zwar dicht an ihrem Rande. Das polygonale Feld, der innerste Theil des Flügels, besteht aus mehreren Schichten von langgestreckten Zellen, deren Richtungen sich kreuzen, und von diesem strahlen nach allen Seiten mehrschichtige etwas dickwandigere Zellstränge aus, welche den ausserordentlich dünnen und zarten, nur aus einer einzigen Zellenschichte bestehenden, enormen Flügel als ein wenig versteifende Nerven durchziehen. In der Querrichtung ist die Flügelfläche, wenigstens in der Längsmitte der Organe meist ein wenig konkav gekrümmt, in der Längsrichtung dagegen, abgesehen von kleinen Unebenheiten flach. Der Hinterrand und die beiden Seitenränder biegen sich schon beim leichtesten Luftzuge.

Der Schwerpunkt fällt meist ziemlich genau in die Mitte der Nuss und seine Lage schwankt annähernd zwischen einem Drittel und einem Viertel der Länge der Queraxe, ohne dass diese Werthe selbst aber erreicht würden.

Was zunächst das allgemeine Verhalten dieser Organe anlangt, so bewegen sie sich in einer Bahn, welche derjenigen des vorigen Typus bis zu einem gewissen Grade ähnlich ist. Je nach der in der Querrichtung mehr oder weniger steilen, ursprünglichen Fallstellung fallen sie anfangs ein längeres oder kürzeres Stück senkrecht oder fast senkrecht herab, dann krümmt sich die Bahn, während sich das Organ, unter Aufwärtsdrehung seiner schweren Vorderkante allmählich in immer horizontalere Lage einstellt, immer mehr von der lothrechten hinweg. Die Abweichung von der lothrechten findet unter anfänglicher Abnahme des Krümmungsradius

der Bahnkurve in der Richtung gegen die Vorderkante zu statt. Aus senkrechter Fallstellung dreht sich dabei immer die konkave Seite nach oben. Schliesslich geht die Bahn in vollkommen horizontale, und — aus steiler Fallstellung — endlich sogar in etwas aufsteigende Richtung über, wobei die Queraxe des Organs beiläufig die jeweilige Richtung einer Tangente der augenblicklichen Bahnkurve des Schwerpunktes einnimmt. Die Aufwärtskrümmung der Bahn erreicht rasch ein Maximum und nun beginnt unter anfänglicher Abwärtsdrehung des schweren Vorderrandes wiederum Abwärtsbewegung des Organes einzutreten. Die Bahn senkt sich neuerdings, und zwar mit zunehmender Steilheit, bis die Queraxe des Organs beiläufig ihren grössten Neigungswinkel zur Horizontalen erreicht hat, dann nimmt die Steilheit allmählich wieder ab und nun wiederholt sich der ganze Gang der Dinge wie von Anfang.

Die gleiche Bewegung setzt sich so beliebig oft fort, indem die sekundären Kurven der Gesammtbewegung allmählich flacher werden und, bei absolut ruhiger Luft, sehr langsam ganz zu verschwinden scheinen. Während der ganzen Bewegung erhält sich die Längsaxe der Organe in stabil horizontaler Stellung.

Durch diese Oszillationen wird nun die Gesammtbahnrichtung sehr wesentlich beeinflusst. Während sie erzeugt werden, ist der Winkel der Gesammtbahnrichtung mit der Horizontalen ein kleinerer wie beim gleichmässigen Gleiten in stabiler Gleichgewichtslage, in Folge dessen pflegen die Fallzeiten der Gesammtbahnen, sowohl im Ganzen als namentlich auch in ihren einzelnen Abschnitten sehr bedeutend zu schwanken, und es kann eine Bahn regellos abwechselnd, bald mehr steiler, bald mehr horizontaler Richtung folgen. Ganz geringe Störungen durch schwache, sonst nicht nachzuweisende Luftströmungen sind auch in den geschlossenen Räumen nicht ganz auszuschliessen und machen sich hier sehr bemerklich.

Bei Exemplaren, welche in der Richtung ihrer Queraxe ganz eben sind, finden nur im ersten Beginn der Bewegung solche Oszillationen statt, und diese sind ausserdem sehr schwach und häufig kaum merklich, so dass die Bahn

vom Momente des Fallens an den Eindruck einer einzigen, einheitlichen Kurve macht, welche unter abnehmendem Winkel zum Horizonte sich zunehmend einer geraden Linie nähert. Die Bahnen solcher Exemplare nähern sich am meisten dem in der Gesammtcharakteristik als typisch angegebenen Verhalten, welches in Wirklichkeit aus später zu erörternden Gründen in ganz reiner Form nicht eintreten kann, am meisten.

So stellt sich der Verlauf der Bahn in vertikaler Projektion dar. In Horizontalprojektion bewegen sich die Organe bald mehr gerad- bald mehr krummlinig. Es wechselt dies ganz ausserordentlich. Im Allgemeinen beschreibt der Schwerpunkt der Organe mehr oder weniger weite Spiralen, welche sich nach unten etwas verengern. In anderen, seltneren Fällen werden ziemlich weite Strecken ganz oder fast geradlinig zurückgelegt.

Die Spiralen selbst sind, so lange die Oszillationen dauern, nicht regelmässig, sondern die einzelnen Stücke derselben sind in der Horizontalprojektion bald etwas mehr, bald etwas weniger stark gekrümmt. Es entsprechen die schwächer gekrümmten Parthien den nach aufwärts konkaven und die stärker gekrümmten den nach abwärts konkaven Bahnstücken. Tritt Gleichgewichtslage ein, so nimmt die Horizontalprojektion eine regelmässige Gestalt mit anfangs zunehmender Krümmung an.

Ich gehe nun auf das Verhalten einiger spezieller Beispiele etwas näher ein. Was zunächst den Winkel anlangt, welchen die Bahn, nachdem sie sich in der Vertikalprojektion einer geraden Linie genähert hat, mit der Horizontalen einschliesst, so lässt sich derselbe nur annähernd feststellen. Ebenso ist es mit der Länge des zurückgelegten Weges und mit der Fallzeit für die einzelnen Bahnabschnitte. Das Verhalten eines und desselben Organes schwankt von Versuch zu Versuch dermassen, dass, abgesehen von der Gesammtfallzeit für jeden einzelnen Versuch an irgend wie genauere Massangaben nicht zu denken ist. Alle hier gegebenen Zahlen ausser den Gesammtfallzeiten sind in Folge dessen nur als approximativ zu verstehen.

Ein Exemplar, welches vorsichtig fallen gelassen, keine

deutliche oder höchstens eine einzige schwache Oszillation um die Gleichgewichtslage ausführte und gleichzeitig in der Horizontalprojektion eine anfangs ziemlich geradlinige Bahn verfolgte, wurde zur Messung des Neigungswinkels seiner Bahn in einem, in der Vertikalprojektion bereits einer geraden sich nähernden Bahnabschnitt benützt. Dasselbe bewegte sich, in quersenkrechter Stellung fallen gelassen, in einer nach oben konkaven, immer flacher werdenden Kurve.

Ein bereits wenig gekrümmtes Stück dieser Kurve, als eine gerade Linie gemessen, bildete die Hypothenuse eines rechtwinkligen Dreiecks, dessen eine Kathete der Horizontal-Projektion entsprach. Da die senkrechte Kathete 30 die Projektion 130 cm mass, so berechnete sich der Winkel, in welchem das Organ sich in dem gegebenen Augenblick der Erde näherte, aus $\frac{30}{130}$ = tang eines Winkels von 12°59'40". Im weiteren Verlaufe der Kurve wurde er noch spitzer, war aber, wegen nunmehriger stärkerer seitlicher Abweichung nicht mehr feststellbar. Der ganze Verlauf der Kurve, soweit er gemessen wurde, ist in Fig. 7 Taf. VI in Vertikalprojektion dargestellt. Aus einer Höhe des Schwerpunktes von 159 cm (a) und mit Vertikalstellung der Queraxe fallen gelassen, verlässt der Same allmählig die Vertikale, kreuzt bei c die Linie go indem er unter dieselbe herab sinkt, um dann mit sehr geringer, einer geraden sich nähernden Krümmung bei d wieder über sie aufzusteigen. Von hier entfernte sich die Bahn in immer schwächerer Krümmung noch fortwährend weiter von der Verlängerung der Linie cd.

Wenn wir, nachdem der Winkel, unter welchem der Same schliesslich wirklich auf dem Boden auftrifft, nicht hinreicht genau festgestellt werden konnte, den thatsächlich grösseren oben berechneten versuchsweise zu Grunde legen, und verlängern die Hypothenuse des berechneten Dreiecks nach rückwärts bis zum Lothe des Ausgangspunktes bei g, und nach vorwärts bis zu ihrem Schnittpunkte mit der Bodenfläche o, so bekommen wir das dem berechneten ähnliche Dreieck glo, welches uns zusammen mit dem obern Theil des Lothes ag einen annähernden Massstab abgibt, welche Entfernung ein von seinem Entstehungsort

hoch oben in der Baumkrone herabfallender Same bei ganz ruhiger Luft unter Umständen erreichen kann, zum mindestens welche Bahnlänge er zurücklegt. Das Anfangsstück a g der Bahn bleibt sich natürlich immer gleich und betrug bei dem vorliegenden Samen $55^2/_3$ cm.

Nehmen wir an, die Frucht reife in einer Höhe von 20 m über dem Boden und der Same falle dann in der angenommenen Stellung herab, so haben wir von dem Lothe von 20 m $55^2/_3$ cm abzuziehen = 19,66 m. Diese entsprechen der senkrechten Kathete eines, dem berechneten ähnlichen, rechtwinklichen Dreiecks, dessen horizontale Kathete die Entfernung darstellt, welche der Same in horizontaler Richtung von seinem Ausgangspunkt erreichen wird. Dieselbe würde hier somit in runder Summe $84^1/_2$ m betragen, d. h. der Same würde erst in einer Entfernung von $84^1/_2$ m von der Basis seines Ausgangslothes zur Erde gelangen.

In Wirklichkeit würde er aber eine noch etwas grössere Entfernung erreichen.

Freilich dürften solche auf grosse Entfernung geradlinige Bahnen äusserst selten vorkommen. Dass sie übrigens möglich sind, beweist das Verhalten eines Samens von Calosanthes indica, von welchem bei Gelegenheit dieser Art die Rede sein wird.

Die meisten Samen beschreiben indessen eine, schon von Anfang an in der Horizontalprojektion stark gekrümmte Spiralbahn, welche sich bis zu einer gewissen Grenze nach unten noch mehr verengert. Der abgebildete Samen z. B., welcher das Verhalten der Mehrzahl der geprüften Individuen wiedergibt, beschrieb auf 3 m Fallhöhe, abgesehen von dem etwas weniger gekrümmten Anfangsstück der Bahn eine Spirale von c. 130 cm mittlerem Durchmesser und machte dabei im Mittel 3 ganze Umgänge. Nehmen wir diese Bahn als in einem Cylindermantel von dem genannten Durchmesser verlaufend an, was wir, da die Spirale sich nach oben nur wenig erweiterte und nach unten nur wenig verjüngte, approximativ thun können, so ergibt sich (nachdem der Umfang des Zylindermantels aus $d\pi = 130 \cdot 3{,}1415 = 420{,}7$ cm beträgt) eine Bahnlänge von 12,62 m, d. h. beiläufig $4^1/_5$mal die Länge des lothrechten Weges.

Wie schon bemerkt, verläuft die ganze Bewegung aber zumeist nicht in einheitlicher Kurve, wie im erstberechneten Fall, sondern setzt sich aus einer grösseren oder geringeren Zahl von Sekundärkurven zusammen, welche ihr eine überraschende Aehnlichkeit mit dem Flug mancher grossflügeliger Vögel und namentlich Tagfalter verleihen. Die Bewegung macht häufig nicht den Eindruck einer passiven, sondern den einer aktiven, durch Willensimpuls hervorgebrachten. Namentlich ist dies der Fall bei plötzlichem Wiederauftreten der Sekundärkurven, nachdem sie ganz aufgehört hatten und ein gleichförmiges Gleiten eingetreten war, oder auch bei scheinbar grundloser Erweiterung der spiraligen Bahn. Das zuletzt berechnete, abgebildete Organ zeigte solches Verhalten in ausgeprägtem Masse.

Die Lage, welche das Organ selbst bei seiner Bahn annimmt, ist nur bei der zeitweilig eintretenden gleichmässigeren Bewegung ruhigen Gleitens eine feste mit bestimmtem Neigungswinkel seiner Queraxe zum Horizonte. Letzterer wurde schwankend zwischen 6^0 und 12^0 gefunden und ist für das einzelne Objekt, je nach der Lage des Schwerpunktes natürlich verschieden.

Die sekundären Kurven sind am leichtesten zu Beginn der ganzen Bewegung zu beobachten. Lässt man z. B. ein Organ aus quer senkrechter Stellung fallen, so treten sie ein wenig stärker auf und sowohl die absteigenden als aufsteigenden Kurvenäste sind etwas länger. Auch hier verhalten sich aber die einzelnen Exemplare sehr verschieden. Während der eine Same bei fallen lassen aus quersenkrechter Stellung schon nach 15 cm Fallhöhe horizontale Stellung annimmt und dann wieder etwas aufsteigt, muss ein anderer 75 cm fallen, um solche Lage anzunehmen und dann wieder aufzusteigen.

Den Anfang der Fallbahn des abgebildeten Versuchssamens Nr. 1 aus quersenkrechter Anfangsstellung zeigt Fig. 1 Taf. VII, aufgenommen nach dem Resultate sehr zahlreicher Fallversuche aus verschiedenen Fallhöhen mit Intervallen von 1 cm auf eine horizontale, mit Entfernungsskala versehene Unterlage. Aus je 10 und mehr Fallversuchen sind die grössten Daten benützt und so ein, soweit ohne ganz

besondere Hülfsmittel möglich, annähernd richtiges Bild dieses Stückes der Bahn gewonnen. Das flacher werden der drei aufeinanderfolgenden Kurven ist sehr charakteristisch.

Die erwähnten Unregelmässigkeiten im Verlaufe der Fallbahnen hängen, abgesehen von kaum vermeidlichen Störungen durch den geringsten Luftzug, wesentlich mit der Entstehung der charakteristischen Sekundärkurven zusammen. Dieselben bewirken, dass es unmöglich ist, für kleine Bahnstücke Fallzeiten zu messen, indem jeder einzelne Fallversuch andere Resultate gibt. Die Resultate verschiedener Versuche mit dem nämlichen Organ weichen bei noch so vorsichtiger Weise des Fallenlassens, Einhaltung des ursprünglichen Neigungswinkels der Queraxe ganz erheblich von einander ab und auch durch Mittelzahlen gelangt man zu keinem sonderlich befriedigenden Resultat. Einzig und allein genau und zuverlässig sind die Zeitmasse für die einzelnen Gesammtbahnen, welche sich aber bei verschiedenen Fallhöhen nur mit der allergrössten Vorsicht aufeinander beziehen lassen. Anfangs steht man hier vor einem Räthsel und erst allmählich erkennt man die Gründe dieses eigenthümlichen Verhaltens. Sie beruhen nämlich im Wesentlichen auf ausserordentlich leicht eintretenden Krümmungsänderungen der überaus biegsamen elastischen Flügelfläche. Manchmal ändert sich z. B. die Flächenkrümmung während der Bewegung und es wird sofort ein dem früheren ganz heterogenes Resultat erzeugt. Oft sind solche Änderungen dem Auge kaum bemerklich. Sie können im Momente des Fallenlassens entstehen und beim Auffallen auf den Boden wieder verschwinden, so dass man kaum begreift, wie irgend ein auffällig abweichendes Resultat zu Stande gekommen ist. Ausserdem spielen nicht mehr nachweisbare Luftströme, welche auch in geschlossenen Räumen nicht ganz auszuschliessen sind, eine gewisse Rolle.

Eine geringe konkave Krümmung der Fläche ist, wie wir später noch eingehender sehen werden, für den ganzen Verlauf der Bewegung und für die richtige Ausnützung des Luftwiderstandes bei den Organen des X. Typus von sehr grosser Wichtigkeit. Dieselbe ist auch bei der Mehrzahl der besprochenen Samen vorhanden. Diese Konkavität dreht

sich ausnahmslos im Beginne der Bewegung nach aufwärts, ganz entsprechend dem früher eingehend geschilderten Verhalten der konkav-konvexen scheibenförmigen Organe.

Was nun die Beobachtung der Fallzeiten selbst anlangt, so habe ich eine grosse Reihe derselben angestellt, ich will indess um so mehr nur zwei davon herausgreifen, als auch noch Beispiele von andern hierhergehörigen Formen zur Besprechung gelangen. Im übrigen bemerke ich, dass bei allen diesen Fallversuchen ausschliesslich quersenkrechte Fallstellung der Organe benützt wurde.

Versuchsorgan 1 (abgebildet Fig. 3 Taf. III): Grösste Länge 110 mm, grösste Breite 43 mm; Breite in der Richtung der Queraxe 41 mm. Schwerpunkt 13 mm vom Vorderrande, genau in der Mitte der Nuss liegend. Flächeninhalt 4390 qmm, wovon beiläufig 100 qmm auf die Nuss gerechnet werden können, so dass die Flügelfläche diejenige der Nuss um fast das 43fache übertrifft. Die Vertheilung der Fläche beiderseits der Schwerpunktslängsaxe (z) war 3209 : 1181 also wie 2,71 : 1. Das Gewicht des ganzen Samens betrug 36,8 mgm; zieht man hievon das Gewicht der in der Grösse von 1 qcm herausgeschnittenen Nuss im Gewichte von 17 mgm ab, so kommen auf den Flügel allein noch 19,8 mgm.

Der Flügel ist ganz ausserordentlich zart und krümmt sich beim leichtesten Luftzuge. In der Ruhe ist er in der Längsmitte in seiner Querrichtung ein klein wenig konkav gekrümmt und das Organ wendet beim Fall ohne Ausnahme die konkave Seite nach oben.

Die Fallzeiten schwankten zwischen 31,6 und 34,6 Sek. auf 6 m Fallhöhe. Auf 3 m schwankten sie zwischen 16,0 und 17,4 Sek. Aus diesen Zahlen ergibt sich bei Subtraktion für den unteren Theil der Bahn eine ganz geringe Beschleunigung, welche auf Rechnung der langsamen Abnahme der Oszillationsamplituden zu setzen ist. Indess bekommt man bei den oszillirenden Organen dieses Typus so sehr schwankende Werthe, und die Differenzen sind im Verhältniss zu den langen Fallzeiten so gering, dass ich vorzog, die Berechnung hier wie in den übrigen Fällen aus den ganzen Fallzeiten vorzunehmen. Die entstehenden Fehler —

um einen ganz kleinen Bruchtheil zu hoch ausfallende Leistungsgrössen — sind sehr unbedeutend. Die Bahn verläuft unter sehr zahlreichen sekundären Kurven, welche sich manchmal mindern und kurze Stücke fast ganz verschwinden, dann aber wieder stärker beginnen. Aus quersenkrechter Fallstellung wurden während der ersten 150 cm Fallhöhe c. 21 solcher Oszillationen gezählt. Die Zahl der Umgänge der ungefähr zwischen 140 und 100 cm Durchmesser sich bewegenden Spiralbahn schwankte bei 6 m Fallhöhe zwischen $4^3/_4$ und 7.

Neigung der Queraxe zur Horizontalen durch die beständigen Oszillationen sehr wechselnd, in Momenten gleichförmigerer Bewegung einen Winkel von c. 6^0 einschliessend.

Berechnen wir nunmehr aus Gewicht und Fläche die theoretische Fallgeschwindigkeit, so nehmen wir mangels sicherer Anhaltspunkte für genauere Schätzung am einfachsten den Koeffizienten 3 gleich 1 an. Für die Neigung der Queraxe wäre eigentlich der Kosinus des Winkels in die Gleichung einzuführen, jedoch erhält sich ja diese Gleichgewichtslage während des Falles nicht dauernd, ausserdem beeinflusst die Kosinusfunktion des kleinen Winkels von 6^0 das Resultat der Berechnung in sehr minimaler Weise. Eine Abschätzung des Werthes der Aufwärtskrümmung, welche durch den Luftwiderstand während des Fluges erzeugt wird, ist ebenfalls unmöglich. Wir sind bei diesem Berechnungsversuch vollständig auf die rein theoretische Formel angewiesen, welche wir ja ohnehin des allgemeinen Vergleiches der Leistungsfähigkeit halber anwenden müssen.

Obige Grössen in die Widerstandsformel eingeführt ergeben

$$v = \sqrt{\frac{19620 \cdot 36{,}8}{0{,}00293 \cdot 4390}}$$

$$v = 356 \text{ mm}.$$

Vergleichen wir diese Geschwindigkeit mit den beobachteten Geschwindigkeiten für 6 m Fallhöhe, so ergibt sich aus 31,6 Sek. 5,26 Sek. pro Meter oder $\frac{1}{5{,}26}$ m = 190 mm pro Sekunde. Aus 34,6 Sek. Fallzeit ergibt sich 5,76 Sek.

pro Meter oder $\frac{1}{5{,}76}$ m = 173 mm pro Sekunde. Es ergibt sich hieraus, dass die berechneten Geschwindigkeiten zu den beobachteten sich in den beiden Grenzfällen verhalten, wie $\frac{356}{190} = \frac{1{,}87}{1}$ und wie $\frac{356}{173} = \frac{2{,}08}{1}$. Im Mittel war die wirkliche Geschwindigkeit also annähernd halb so gross wie die theoretische.

Versuchsorgan 2. Grösste Länge 100 mm, grösste Breite 43 mm; in der Richtung der Queraxe 42 mm. Schwerpunkt $12^1/_2$ mm vom Vorderrande, fast in der Mitte der Nuss liegend. Flächeninhalt 3565 qmm. Flächenvertheilung beiderseits der Schwerpunktslängsaxe 2559 : 1006 = 2,5 : 1. Das Gewicht betrug 37 mgm. Der Flügel des Organs war zwar etwas steifer aber flacher wie der des ersten. Die Fallzeiten auf 6 m schwankten zwischen 18,8 und 21 Sek. Die Bahn verlief viel gleichförmiger wie bei Versuchsorgan 1; die Zahl der sekundären Kurven war geringer (c. 11 auf 150 cm Fallhöhe und aus senkrechter Fallstellung) und diese selbst verlaufen sehr flach und kaum merklich unter ganz langsamer Drehbewegung des Organs.

Die Berechnung der theoretischen Geschwindigkeit ergibt hier (ebenfalls für 3 = 1) 396 mm pro Sekunde. 18,8 Sek. Fallzeit auf 6 m entsprechen 319 mm Fallraum auf die Sekunde, und 21 Sek. entsprechen 285 mm. Die berechneten Geschwindigkeiten verhalten sich also zu den beiden beobachteten wie $\frac{396}{319} = \frac{1{,}24}{1}$ und wie $\frac{396}{285} = \frac{1{,}39}{1}$. Wie man sieht, bleibt die wirkliche Fallgeschwindigkeit gegenüber der theoretischen zwar noch zurück, jedoch ist die Leistungsfähigkeit des Versuchsorgans 2 eine weitaus geringere als die von 1.

Mit diesen beiden Beispielen habe ich zwei Grenzformen in der Leistungsfähigkeit angeführt, welche sich im übrigen relativ gleichförmig verhielten, resp. keine sehr grossen Schwankungen in ihrer Leistungsfähigkeit aufwiesen. Zwischen diesen in der Mitte stehen nun aber sehr viele, welche weit grössere Schwankungen zeigen. Die durchschnittliche Leistungsgrösse wohlentwickelter Samen scheint mir dabei,

so weit ich nach meinen Versuchen urtheilen kann, näher an der oberen, wie an der unteren Grenze zu liegen.

Wenn ein Same von Bignonia echinata auf seinem Flug an ein Objekt anstösst, so kann er nicht leicht mehr von demselben wegkommen, indem er sich, selbst wenn er nur mit dem einen Flügelende anstösst, sofort mit dem übrigen Körper um den betreffenden Punkt drehen muss, er dreht sich also immer dem Gegenstande zu und gleitet nur, wenn der letztere eine hinreichend glatte Oberfläche besitzt, in anfangs horizontaler, dann aber geneigter und quersenkrechter Stellung an demselben hinab, bis er, oft an den geringsten Vorsprüngen in dieser Stellung hängen bleibt.

Über die Lebensweise der besprochenen Art konnte ich nichts näheres in Erfahrung bringen, indessen wäre es wohl möglich, dass die genannte Eigenschaft der Samen biologische Bedeutung besitzt.

Samen von Calosanthes indica (Bignoniac.).

Eine Anzahl wohl entwickelter Samen erhielt ich durch die Güte des Herrn Geheimrathes Professor von Sachs.

Die Samen sind kleiner und schwerer, wie die der vorigen Art, sind aber im Ganzen sehr ähnlich gestaltet, nur im Verhältniss zur Breite weniger lang. Im Umriss sind sie mehr oder weniger elliptisch und allerhöchstens doppelt so lang wie breit. Meist sind sie aber kürzer. Der Flügel ist etwas steifer wie bei den vorigen. In der Querrichtung ist er schwach konkavkonvex gekrümmt. Meist auch in der Längsrichtung, doch geringer. Das Verhalten ist im Grossen und Ganzen das gleiche.

Versuchsorgan 1. Grösste Länge 80 mm, grösste Breite 41 mm, Breite in der Richtung der Queraxe $39^1/_2$ mm. Schwerpunkt $10^1/_2$ mm vom vordern Rande entfernt, inmitten der relativ schweren, beiläufig 200 qmm grossen flach linsenförmigen Nuss. Flächeninhalt 2723 qmm. Flächenvertheilung beiderseits der Schwerpunktslängsaxe 1922 : 801 = 2,4 : 1. Das Gewicht betrug 132,8 mgm.

Die Bahn verlief meist in einer Spirale von 70—100 cm Durchmesser und machte ziemlich viele Sekundärkurven. Bei einem durchschnittlichen Spiralendurchmesser von 70 cm

zählte ich 8 Umgänge. Bei grösserem Durchmesser sank ihre Zahl. In einzelnen Fällen aber bewegte sich das Organ fast geradlinig ganz bedeutende Strecken und bog erst zum Schluss in eine rasch sich verengernde Spirale seitlich aus. Einmal bewegte es sich mit ganz geringer Krümmung auf 4 m Fallhöhe 12,80 m weit und bog dann nach links zu einer langsam sich verengernden Spirale aus. Dabei machte es eine auffallend grosse Zahl kurzer rascher Oszillationsbewegungen und gebrauchte zur ganzen Fallhöhe von 6 m die längste, überhaupt beobachtete Zeit, nämlich 17,4 Sekunden. Sonst bewegte sich die Fallzeit meist zwischen 14,2 und 15 Sekunden.

Berechnen wir die theoretische Fallgeschwindigkeit, so erhalten wir

$$v = \sqrt{\frac{19620 \cdot 132{,}8}{0{,}001293 \cdot 2723}}$$

$$v = 860 \text{ mm}.$$

17,4 Sek. auf 6 m entsprechen 2,9 Sek. auf 1 m oder 345 mm Fallraum auf 1 Sekunde. 14,2 Sek. auf 6 m entsprechen 2,36 Sek. auf 1 m oder 423 mm auf 1 Sekunde. Diese beiden Grenzgeschwindigkeiten, verglichen mit der berechneten ergeben im ersten Fall $\frac{860}{345} = \frac{2{,}49}{1}$ und im zweiten $\frac{860}{423} = \frac{2{,}03}{1}$.

Die erstere Grösse ist die höchste, welche ich bei Organen dieses Typus überhaupt beobachtet habe. Sie ist geradezu enorm. Sie wurde, wie alle übrigen, in einem geschlossenen Raum, bei nahezu windstillem Wetter und unter Kontrole einer mir assistirenden zweiten Person beobachtet.

Versuchsorgan 2. Grösste Länge 73 mm, grösste Breite 41 mm, Schwerpunkt 11 mm vom Vorderrande, inmitten der Nuss liegend. Da die Schwerpunktsqueraxe 41 mm mass, so war der Schwerpunkt gegenüber dem vorigen Organ stärker gegen den Vorderrand verschoben. Der Flächeninhalt betrug 2550 qmm. Das Gewicht 151,5 mgm. Der Flügel war in Ruhe schwächer konkav gewölbt, wie Nr. 1, nahm jedoch schon bei ganz schwachem Blasen vollkommen flache Gestalt an mit vielleicht etwas entgegengesetzt gerichteter Konkavität. Letztere Gestalt erhielt sich

in Ruhe ebenfalls und konnte durch ebenso geringes Blasen wieder in erstere zurückgeführt werden.

Die beobachteten Fallgeschwindigkeiten auf 6 m Fallhöhe bewegten sich nach vielen Versuchen entweder nahe um 6,2 oder um 8,4 Sekunden. Es entspricht dies 970 mm resp. 714 mm auf die Sekunde.

Die theoretische Fallgeschwindigkeit ergab für 3 = 1 949 mm. Also ist das Verhältniss der berechneten und beobachteten Geschwindigkeiten im ersteren Fall $\frac{949}{970} = \frac{0{,}97}{1}$ und im zweiten $\frac{949}{714} = \frac{1{,}33}{1}$.

Wir sehen hier also die Leistungsfähigkeit im ersten Fall bis unter die Grösse 1 herabsinken. Dabei stellte sich das Organ mit seiner Queraxe in einem etwa auf 24—26° geschätzten Winkel zur Horizontalen ein und machte, soweit man bei der Schnelligkeit der Bewegung beobachten konnte keine Oszillationsbewegungen.

Im zweiten Falle wurden undeutliche Oszillationsbewegungen in geringer Zahl beobachtet, welche flache langgestreckte Sekundärkurven der Bahn erzeugten. Der Winkel, welchen die Queraxe mit der Horizontalen einschloss, wurde während der mittleren Stellungen, welche der Gleichgewichtslage wohl am nächsten kamen, auf c. 15—18° geschätzt. Die letztere Bewegungsart mit geringerer vertikaler Geschwindigkeit und schwachen Oszillationsbewegungen entsprach, wie aus sehr zahlreichen Versuchen hervorging, der gewölbteren, und die erstere, mit grösserer Vertikalgeschwindigkeit ohne Oszillationsbewegungen der flachen Gestalt des Organs.

Im Anschluss an die Samen der genannten zwei Bignoniaceen-Arten will ich noch eine im Münchener Staatsherbarium unter dem Namen Bignonia cyrtantha Mart. aufbewahrte Art, von der ein Same Fig. 5 Taf. III in natürlicher Grösse abgebildet ist, wenigstens kurz erwähnen. Die Organe haben einen sehr steifen, wenig elastischen Flügel. Das abgebildete Exemplar, mit dem einige Versuche angestellt

wurden, war ganz eben. Der Vorderrand des Flügels war auf der Strecke zwischen a und b stark verdickt (in der Mitte bis 1,5 mm) und bildete gewissermassen eine Verbreiterung der Nuss. Die beiderseitigen Flügelhälften waren, wie bei den meisten Exemplaren, sehr ungleich in der Grösse. Der Schwerpunkt war relativ wenig verschoben und die durch ihn abgeschnittenen Stücke der Queraxe verhielten sich wie 5 : 8. Die Bahn, welche dieses Organ beschrieb, war eine Spirale von oben 50 unten 15—20 cm Radius und die Fallgeschwindigkeit, welche wenig schwankte, entsprach fast genau der für 3 = 1 berechneten, so dass die Leistungsfähigkeit = 1 war. Sekundäre Kurven konnten bei der übrigens rasch vor sich gehenden Bewegung gar nicht beobachtet werden.

Samen von Zanonia javanica (Cucurbitac.).

Der überaus grossen Liberalität des Herrn Geheimrathes Professor v. Sachs verdanke ich mehrere Exemplare dieser sehr interessanten und werthvollen Versuchsobjekte. Dieselben, 4 an der Zahl, befanden sich in offenbar vollständig reifem Zustande. Ein mächtiger, glasartig durchscheinender, am Rande ziemlich durchsichtiger, nervenloser Flügel von beiläufig nierenförmiger Gestalt umzieht die mehr oder weniger elliptische, flach zusammengedrückte und scharf abgesetzte Nuss. Letztere liegt dicht am Rande der konvex gestalteten vorderen Längskante. Die Hinterkante ist, einigermassen der Schwanzflosse eines Fisches ähnlich, in zwei, durch eine seichte Einbuchtung geschiedene Lappen ausgezogen. Die Flügel besitzen in der Regel nach der Quer- wie nach der Längsrichtung, besonders nach der letzteren, eine schwache Flächenkrümmung, so dass sie ein wenig ausgebaucht erscheinen, während die Seitenränder wieder ein wenig flacher und relativ etwas zurückgekrümmt sind. Die Flügel besitzen einen ähnlichen Grad von elastischer Biegsamkeit resp. Steifheit wie die der vorigen Art.

Versuchsorgan 1 (Fig. 4 Taf. III). Grösste Länge 101 mm, grösste Breite 57 mm, Breite in der Richtung der Queraxe 54 mm. Schwerpunkt 17 mm vom Vorderrand entfernt, etwas jenseits der Mitte der Nuss. Gesammter Flächen-

inhalt der grössten Projektion des Organs 4750 qmm, hievon kommen auf die Nuss etwa 320 qmm.

Von der Gesammtfläche liegen 3399 qmm diesseits und 1351 qmm jenseits der Längsaxe*), das Verhältniss der beiden Theile ist also $= \frac{2,5}{1}$. Das Gewicht betrug 177 mgm, wovon der Flügel, nach dem Gewicht des Flügels eines anderen beschädigten Exemplars, welches fast gleiche Grösse und Gestalt besass, etwa 30 mgm betragen mochte, so dass auf die Nuss beiläufig 147 mgm kamen.

Die Bahn verlief in Spiralen, welche auf 6 m Fallhöhe zwischen 5 und $11^3/_4$ Umgänge machten. Im letzteren Fall betrug der Durchmesser der unteren Spiralen c. 75—80 cm. Das Organ machte während seines Fluges viele und starke Oszillationen welche ansehnliche Sekundärkurven erzeugten.

Bei diesem Organ stellten die Sekundärkurven, von oben betrachtet, also in der Horizontalprojektion der Bewegung, ganz besonders deutlich relativ wenig gekrümmte Bahnstrecken dar, welche durch kurze stärker gekrümmte knieförmige Stücke miteinander verbunden waren. Die Bahn des Schwerpunktes zeigte somit keine regelmässig spiralige, sondern mehr oder weniger polygonal-unregelmässige Gestalt, deren Durchmesser sich nach abwärts bis zu einem gewissen Grade verengerte, dann aber annähernd konstant blieb. Die Kniestücke behielten dabei, soweit es zu beobachten möglich war, ihre Winkelgrösse bei, wogegen die wenig gekrümmten Polygonseiten, entsprechend den kürzer und flacher werdenden sekundären Kurven sich verkürzten. Andeutungsweise wurde übrigens ähnliches Verhalten bei den meisten geprüften Organen beobachtet, indess bei keiner einzigen Form so ausgezeichnet wie hier. Am wenigsten erkennbar ist es bei den Samen von Bignonia echinata. Bei Calosanthes indica tritt es etwas mehr hervor, doch nur an den Individuen mit stärkerer Flächenkrümmung.

Die Fallgeschwindigkeit schwankte zwischen 16,4 und

*) In der Abbildung erscheint die Längsaxe (z) und damit auch der Schwerpunkt, welcher dem Schnittpunkte der Längs- und Queraxe (x) entspricht, irrthümlicherweise um beiläufig 1 mm zu nahe an den Vorderrand des Organes gerückt!

18,8 Sekunden auf 6 m Fallraum, was im ersten Falle 2,73 Sek. pro Meter oder 366 mm pro Sekunde und im zweiten 3,13 Sek. pro Meter oder 319 mm pro Sekunde entspricht.

Berechnen wir aus obigen Grössen für Gewicht und Projektionsfläche (für $\zeta = 1$) die theoretische Geschwindigkeit, so erhalten wir:

$$v = \sqrt{\frac{19620 \cdot 177}{0{,}001293 \cdot 4750}}$$

$$v = 751 \text{ mm}.$$

Diese berechnete Geschwindigkeit verglichen mit den beobachteten Grenzgeschwindigkeiten ergibt somit im ersten Fall $\frac{751}{366} = \frac{2{,}05}{1}$ und im zweiten $\frac{751}{319} = \frac{2{,}35}{1}$.

Versuchsorgan 2. Von ähnlichem Umriss wie das vorige, nur verhältnissmässig etwas länger, 105 mm grösste Länge auf 54 mm grösste Breite messend, Breite in der Richtung des Querdurchmessers 50 mm. Gesammtflächeninhalt der grössten Projektion 4690 qmm, Gewicht 233 mgm. Das Organ war bedeutend flacher wie das vorige, sowohl in Längs- wie Querrichtung nur ein wenig konkav aufwärts gekrümmt.

Die Fallgeschwindigkeit schwankte zwischen 15,2 und 15,8 Sek. auf 6 m Fallhöhe, also zwischen 395 und 380 mm pro Sekunde. Die auf gleiche Weise wie bei 1 berechnete theoretische Fallzeit ergibt 838 mm, also liegt die Grenze der Leistungsfähigkeit zwischen $\frac{838}{395} = \frac{2{,}12}{1}$ und $\frac{838}{380} = \frac{2{,}2}{1}$.

Leistungsgrösse des Typus.

Dieselbe schwankt, wie sich aus den Versuchen mit den angeführten natürlichen Objekten ergibt, ganz bedeutend. Von weniger als 1 bei dem 2. Versuchsorgan von Calosanthes indica steigt sie an bis zur fast zweiundeinhalbfachen Grösse beim 2. Versuchsorgan der nämlichen Art, genau genommen von 0,97 bis 2,49. Bei stärkerer Verschiebung des Schwerpunktes und ganz ebenem Flügel kann sie sogar noch tiefer, als bis zur ersteren Grösse herabsinken. Ob sie aber wesentlich höher ansteigen kann, als 2,49 ist zweifel-

haft und sogar unwahrscheinlich, wenigstens gelang es mir mit künstlichen Modellen nicht, diese Leistungshöhe oder auch nur eine annähernde zu erzielen.

Wir sehen hier, im Gegensatze zum vorigen Typus, mittelst der natürlichen Flugapparate die höchstmöglichen Leistungen hervorgebracht, welche man auf künstlichem Wege aus Mangel an dem geeigneten Material nur schwierig erreichen kann. Beim IX. Typus erreichte umgekehrt keines der geprüften natürlichen Organe auch nur annähernd die mittelst Modellen ohne Schwierigkeit erzeugten Resultate. Übrigens weisen einzelne Organe des X. Typus überhaupt die höchsten beobachteten Leistungen sämmtlicher näher studirten Flugorgane, mit Ausnahme der staubförmigen und haarförmigen auf. Dieselben überschreiten diejenigen einiger, ihnen übrigens sehr nahekommender Organe des XII. Typus noch um etwas. Im Durchschnitt der Leistungen aller vorkommenden Organe der beiden Typen dürften übrigens gleichwohl die letzteren überwiegen, soweit nach der relativ nicht unbedeutenden Zahl untersuchter Beispiele geschlossen werden kann. Die Gründe hiefür liegen darin, dass die hohe Leistungsfähigkeit des X. Typus im wesentlichen an eine, bei den einzelnen Organen sehr schwankende Ausrüstung geknüpft ist, nämlich an die weder zu grosse oder zu kleine Flächenkrümmung in der Querrichtung der Organe, wogegen sie bei dem XII. Typus mit der Art der Bewegung überhaupt verbunden ist. Im Prinzip sind die Mittel zu dieser hohen Ausnützung für alle 3 Typen übrigens dieselben.

Man kann bei diesem Typus oszillirende und nicht oszillirende Formen unterscheiden. Nur die ersteren zeigen die abnorm hohe Leistungsfähigkeit, wogegen dieselbe bei den letzteren um die Grösse 1 schwankt und sogar bedeutend darunter sinken kann.

Auch bei den oszillirenden Formen muss in absolut ruhiger Luft und bei bedeutenderer Höhe der Fallräume schliesslich Gleichgewichtslage und damit Herabsinken der Leistungsgrösse eintreten. Indess ist auch in gutgeschlossenen Räumen von der Grösse, wie man sie zu diesen Fallversuchen benöthigt, nicht leicht ausreichende Ruhe der Luft

zu erzielen. Nur wenn man die Organe von einer glatten Fläche, in einem der Gleichgewichtslage möglichst entsprechenden Neigungswinkel vorsichtig abgleiten lässt, erlangt man bei Exemplaren, welche engere Spiralen beschreiben und welche man in Folge dessen in kleineren Räumen zu Versuchen benützen kann, um 1 schwankende Leistungsgrösse.

Im Freien ist absolute Ruhe der Luft so gut wie nie vorhanden und ausserdem das Zusammentreffen aller übrigen Bedingungen nicht leicht möglich. Aus den mehr oder weniger senkrecht nach abwärts hängenden, grossen und schweren Kapseln der hierhergehörigen Bignoniacen-Arten, welche sich der Länge nach öffnen, müssen die Samen beispielsweise in besonders günstiger Lage zur sofortigen Erzeugung ausgiebiger Oszillationen, nämlich in steiler Flächenstellung ihre Luftreise antreten.

Es dürfte somit gerechtfertigt erscheinen, für die Geschwindigkeit der Vertikalbewegung im Freien die ganze Höhe der in Folge Oszillirens in geschlossenen Räumen erlangten Leistungsgrösse in Rechnung zu setzen.

Zur Mechanik der Bewegung.

a. Die Vertikalbewegung.

Belastet man die eine Längskante länglich rechteckiger Stücke von Schreibpapier mit aufgeklebten Kartonstreifen oder Siegellacktröpfchen und steigert diese Belastung allmählich, so verhalten sich dieselben beim fallen lassen aus quersenkrechter Stellung anfangs noch ähnlich wie unbelastete, also wie die Organe oder Modelle des vorhergehenden Haupttypus. Bald aber kommt man an die Grenze, über welche hinaus die Platten nicht mehr rotiren, wenigstens dann nicht, wenn man sie mit abwärts gerichteter belasteter Kante fallen lässt. Sie rotiren aber noch, wenn sie mit abwärts gerichteter unbelasteter Längskante fallen. Steigert man nun die Belastung noch weiter, so dreht sich eine solche Platte, aus der letztgenannten Stellung fallend, rasch etwas mehr, als nöthig ist, um die belastete Kante senkrecht nach abwärts zu bringen. Dann aber schlägt sie

unter ganz langsamer neuerlicher Aufwärtsdrehung eine schiefwinkelig zur Erde geneigte, gekrümmte Bahn ein.

Lässt man dasselbe Modell aus quersenkrechter Stellung mit nach abwärts gekehrter schwerer Kante fallen, so schlägt es sofort die letzterwähnte schiefe Bahn ein. Es bewegt sich anfangs senkrecht abwärts, weicht aber rasch von der lothrechten ab, indem es anfängt, sich etwas schief zu stellen, diese Neigung steigert sich mehr und mehr, und die Bahn geht in einer nach oben konkaven, langgestreckten Kurve immer mehr in horizontale und schliesslich sogar wieder etwas aufsteigende Richtung über. Sobald diese Stellung eingetreten ist, dreht sich die schwere Kante neuerdings mit einem lebhaften Ruck nach abwärts und nun können noch 1—2 kleine ähnliche Kurven folgen, dann fällt die Platte in meist unregelmässiger Bewegung zur Erde nieder.

In dieser letztgeschilderten Weise bewegt sich ein Papierblatt von 50 mm Breite auf 100 mm Länge, wenn durch entsprechende Belastung der Schwerpunkt von der Mitte der medianen Queraxe um etwas mehr als 7 mm gegen die belastete Karte verschoben wird. Er befindet sich dann $17^2/_3$ mm von der belasteten und $32^1/_3$ mm von der nicht belasteten Kante, also bei $\frac{53}{95} = \frac{1}{1{,}83}$ der Länge der Queraxe und die durch ihn gehende Längsaxe theilt die gesammte Fläche in gleichem Verhältniss.

Bei noch stärkerer Belastung fällt das Modell anfangs etwas steiler hinab, bewegt sich aber dann in einer, um so weiter von der lothrechten abweichenden entsprechenden Bahn. (Vergl. hiezu die in Vertikalprojektion dargestellten Bahnkurven solcher Modelle bei verschiedenen Schwerpunktslagen Fig. 2 Taf. VII.)

Diese Bahnkurven sind dieselben, wie wir sie als Sekundärkurven bei den Samen von Bignonia echinata sahen, nur besitzen sie längere Äste, indem die Fallbewegung, entsprechend der grösseren Masse und damit der grösseren lebendigen Kraft eine viel beschleunigtere ist. Durch die anfangs erlangte raschere Fallbewegung wird der Luftwiderstand, welcher die Kraftkomponente für die Erzeugung der horizontalen Bewegung liefert, bedeutend vergrössert.

Wir haben bei den nicht belasteten, länglichen Platten gesehen, dass der ihrer Fallbewegung entgegenwirkende Luftwiderstand sie, sobald sich ihre Fläche schief stellt, in der vorangehenden Parthie nach aufwärts zu drehen beginnt. Dies geschieht, weil der Angriffspunkt des Luftwiderstandes nach dem Prinzip des erschwerten Luftabflusses an der vordern Parthie geneigter Flächen nicht mehr mit dem Schwerpunkte zusammenfällt, sondern sich, je steiler die Neigung der Platte ist, desto mehr von ihm entfernt und nach vorwärts verschiebt. Wenn daher eine solche Platte sich in einem relativen Gleichgewicht ihrer Lage zu dem Luftwiderstand erhalten soll, so muss der Schwerpunkt ebenfalls, entsprechend der stärkeren Neigung, in der Richtung gegen die abwärts geneigte Kante verschoben werden. Dies ist nun bei den geschilderten Platten geschehen. Ebenso ist es bei den nach gleichem Prinzip gebauten pflanzlichen Flugapparaten der Fall.

Lässt man dieselben in geneigter Lage ihrer Queraxe fallen, so suchen sie sich so einzustellen, dass der Angriffspunkt des Luftwiderstandes mit dem Schwerpunkt der Platte zusammenfällt, indem sie sich in einer, aus der Wirkung der Schwere und der senkrechten und horizontalen Komponente des Luftwiderstandes resultirenden Bahn schief nach abwärts bewegen.

Es bildet diese Bahn eine nach unten konvexe Kurve, d. h. sie nähert sich in ihrem Verlaufe immer mehr einer horizontalen, indem mit der anfangs steigenden Fallgeschwindigkeit auch der Luftwiderstand, und zwar mit dem Quadrat der Geschwindigkeit wächst, ausserdem verschiebt sich seine Resultirende, wenn einmal die krummlinige Bewegung begonnen hat, immer nur nach deren jeweiliger Richtung. Dadurch erhält sich aber ihr Angriffspunkt dauernd vor dem Schwerpunkt und die drehenden Kräfte behalten so längere Zeit ihre Wirksamkeit. Die Platte sucht sich immer wieder ins Gleichgewicht zum Luftwiderstande zu setzen.

Die einmal eingeleitete Drehung um die Längsaxe wird aber durch Summirung der drehenden Kräfte in den aufeinanderfolgenden Zeittheilchen so beschleunigt, dass sie unter Umständen nicht nur bis zur Horizontalstellung der Platte,

sondern mehr oder weniger über diese hinaus bis zu Höherstellung der schweren Vorderkante fortschreitet, und dass sich der Angriffspunkt des Luftwiderstandes weit hinter den Schwerpunkt verschiebt.

Die lebendige Kraft der fortschreitenden Bewegung des Apparates ist dabei so gross, dass sie genügt, um in Folge des schliesslich horizontal entgegenwirkenden Luftwiderstandes sogar die Schwere zu überwinden. Der Apparat steigt entsprechend der Grösse und Richtung seiner Resultirenden ein, wenn auch relativ kleines Stück wieder in die Höhe. Sobald dann die lebendige Kraft verbraucht ist, was bei der geringen Masse und der starken Luftreibung sehr rasch geschieht, macht sich überwiegend wiederum die Wirkung der Schwere geltend und nun fällt die Platte mit dem Erlöschen ihrer Eigenbewegung neuerdings mit wachsender Steilheit abwärts.

Entsprechend der jetzt zur Bewegungsrichtung umgekehrten Neigung greift die Resultirende hinter dem Schwerpunkt, in der Nähe der nicht belasteten Hinterkante an. Da der Schwerpunkt dem Vorderrande genähert ist, so wirkt sie in Folge des sehr verlängerten Hebelarmes ihres Momentes sehr stark drehend nach aufwärts und der Apparat geht neuerdings durch horizontale Stellung hindurch rasch in eine, steil mit der Vorderkante nach abwärts geneigte über. Seine Bewegung ist während dieses Vorganges eine zunehmend steilere und raschere. Mit dieser Drehung in umgekehrtem Sinne verschiebt sich der Angriffspunkt des Luftwiderstandes wieder vorwärts und überschreitet neuerdings den Schwerpunkt. Von nun an wiederholt sich immer wieder der schon beschriebene Gang der Dinge, mit dem einzigen Unterschiede, dass der Winkelausschlag der Drehungen des Apparates um seine Längsaxe ein zunehmend kleinerer wird.

Früher oder später tritt bei ganz absolut ruhiger Luft wirkliche stabile Gleichgewichtslage ein und die Bahn des Schwerpunktes wird dann in Vertikalprojektion eine annähernd geradlinige. Diese Gleichgewichtslage wird unter Umständen sehr rasch und leicht, nach ganz wenigen sehr schwachen Oszillationen erreicht, und erhält sich dann

dauernd, oder sie tritt, wie wir bei den meisten natürlichen Organen sehen, nur sehr schwierig ein. In letzterem Fall ist die Bahn aus lauter Sekundärkurven zusammengesetzt, welche sich nur ganz allmählich etwas verflachen und eventuell, jedoch erst nach Durchmessung höherer Fallräume, in absolut ruhiger Luft einer geraden Linie nähern. Solche Organe kommen aber ganz ausserordentlich leicht aus ihrer einmal erlangten Gleichgewichtslage wieder heraus.

Der in Gleichgewichtslage beobachtete Neigungswinkel der Queraxe zum Horizont schwankte zwischen 7^0 und 25^0 bei den untersuchten natürlichen Objekten. Die Grösse desselben hängt bei sonstiger vollkommener Gleichheit der Apparate von der Grösse der Verschiebung des Schwerpunktes und der Stärke der Flächenkrümmung ab.

Der Grund der grossen Verschiedenheiten der Organe in der Annahme der Gleichgewichtslage liegt dagegen ausschliesslich an der verschiedenen Krümmung der Fläche. Ganz ebenflächige Organe machen sehr geringe Oszillationen und gehen rasch in Gleichgewichtslage über. Umgekehrt sind ganz schwache Krümmungen in der Richtung der Queraxe die Ursache starker und fortgesetzter Oszillationen. Steigt diese Krümmung über ein gewisses Mass hinaus, so hindert sie, wie man sich leicht durch Versuche mit Papiermodellen überzeugen kann, die hinreichende Ausnützung des Luftwiderstandes und das Verhalten nähert sich demjenigen der konvex scheibenförmigen. Die Fallrichtung nähert sich mehr der senkrechten und die Geschwindigkeit steigt.

Der Grund der auffallenden Erschwerung der Annahme der Gleichgewichtslage bei den quergekrümmten Organen liegt an der ganz besonders erleichterten Erzeugung senkrecht zur Bewegungsrichtung gerichteter Widerstandskomponenten. Dieselben entstehen gleichzeitig am vordern Theile der konvexen Unterseite, wie am hintern Theil der konkaven Oberseite und wirken zu einander gleichsinnig. Krümmungen, welche etwa derjenigen von Fig. 4 Taf. VII. entsprechen, sind am günstigsten zur Erzeugung starker und anhaltender Oszillationen.

Auf die Gestalt und Grösse der Sekundärkurven hat im Übrigen Einfluss die Lage des Schwerpunktes. Je ex-

zentrischer derselbe gelagert ist, um so länger werden bei gleicher Flügelkrümmung die Kurvenäste. Verlegt man den Schwerpunkt immer weiter gegen die Längskante, so ergibt sich, dass eine bestimmte Lage desselben die günstigste ist für die Ausnützung des Luftwiderstandes. Dieselbe liegt zwischen $\frac{2,4}{1}$ und $\frac{3}{1}$ der Länge der Queraxe und ermöglicht bei gleichzeitiger schwacher Krümmung, welche für stärkere Exzentrizität des Schwerpunktes eine etwas stärkere sein muss, die höchsten Leistungen. Es entspricht diese Lage ganz derjenigen, welche bei den natürlichen Organen beobachtet wurde.

Geht ein Organ von einer geringen Oszillation gleich im Beginne seiner Bahn in ruhig gleitende Bewegung über, wie es für ein Individuum von Bignonia echinata geschildert wurde, so entsteht eine Bahn, deren Steigungswinkel dauernd abnimmt. Vollständig gerade wird aber die Bewegung niemals, sondern sie nähert sich nur mehr oder weniger dieser Gleichförmigkeit.

In diesen Fällen erlangt das Organ aus senkrechter Fallstellung eine grössere Fallgeschwindigkeit, als ihm in seiner Gleichgewichtsstellung zukommt und daraus resultirt unter allmählicher Einstellung in diese Gleichgewichtslage die charakteristische Bahn. Minimale Oszillationen, welche aber so flache Kurven darstellen, dass sie unter Umständen gar nicht mehr beobachtet werden können, müssen übrigens dennoch dabei auftreten.

Ganz anders aber verhält sich die Gesammtbahnrichtung bei andauernden stärkeren Oszillationen. Wie aus den Beobachtungen bei natürlichen Flugorganen hervorgeht und auch aus der später anzuführenden Versuchsreihe mit Modellen erhellt, ist die vertikale Geschwindigkeit während derselben eine sehr bedeutend verminderte und die vertikale Längsprojektion der Bahn stellt, abgesehen von den Sekundärkurven, eine mit der Abnahme der Oszillationen zunehmend steilere Kurve dar.

Ist es schon in geschlossenen Räumen sehr schwierig bei solchen Organen Gleichgewichtslage zu erzielen, so ist dies im Freien in noch viel höherem Grade der Fall. Dort

können die Oszillationen überhaupt nicht zum Stillstande kommen und die Fallgeschwindigkeit kann nicht über die anfängliche geringe Höhe steigen.

Was den nähern Grund der hohen Leistungsfähigkeit der oszillirenden Organe in Ausnützung des Luftwiderstandes anlangt, so liegen hier ähnliche Verhältnisse vor, wie bei den drehenden Organen des IX. Typus. Die Sache verhält sich nur in mancher Beziehung einfacher, indem keine vollständigen halben Drehungen ausgeführt werden, sondern höchstens Viertelsdrehungen. Dieselben sind abwechselnd gegensinnig. Es finden auch hier, wie dort, Verlegungen der momentanen Drehaxe statt, wobei ähnliche Wirkungen erzielt werden. Bei jeder Drehung, ob im einen oder im andern Sinne, resultirt dabei eine relative Höherverlegung des Schwerpunktes und somit des ganzen Organes. Die im Verhältniss zum vorigen Typus sehr geringe lineare Drehgeschwindigkeit wird hier ausschliesslich in einer, und zwar in günstiger Richtung ausgenützt. Hieraus erklärt sich auch die abnorm hohe Leistungsfähigkeit.

Die nämlichen Luftstrahlen, welche dem Organ eine Drehungsbewegung mittheilen, verursachen, indem sie an der Unterfläche der sich drehenden Platte hingleiten, auf ihrem weiteren Wege auch wieder eine Hemmung der eingeleiteten Drehbewegung. Auch die, sonst in horizontaler Richtung abfliessenden und nicht oder kaum ausgenützten Luftstrahlen kommen so zur Ausnützung.

Die Kompression der am Abfluss nach rückwärts gehinderten Luftstrahlen wird damit eine sehr bedeutende, indem dieselben nur nach den beiden Seiten (also in der Richtung der Längsaxe) relativ leicht abfliessen können. Je länger daher eine Platte bei gleichbleibender Breite wird, um so mehr wird der Abfluss auch in dieser Richtung erschwert, und um so höher steigt die Ausnützung des Luftwiderstandes, also der Leistungsfähigkeit.*)

*) Vgl. die Resultate der Tabelle I, Seite 223, sowie den Abschnitt über experimentelle Feststellung des Angriffspunktes des Luftwiderstandes p. 35.

Eine sehr bedeutende Stabilität der Gleichgewichtslage in Bezug auf ihre Queraxe gewährt den natürlichen Flugorganen von Bignonia echinata die hohe, elastische Biegsamkeit der beiderseitigen Flügelenden. Die steiferen Papiermodelle kippen dagegen leichter nach einer oder der andern Seite um und gehen dadurch in unregelmässige Fallbewegung über. Die Apparate befinden sich bei ihrer, relativ zur Breite nur wenig überwiegenden Länge in ziemlich labilem Gleichgewicht, das relativ leicht gestört und dann nicht mehr leicht erlangt wird.

Bei den natürlichen Organen werden nun durch den Luftwiderstand die beiderseitigen biegsamen Flügelenden etwas nach aufwärts gebogen, oder die Organe besitzen in der Längsrichtung eine schwache Flächenkrümmung. Dadurch wird erstens bewirkt, dass die Luft etwas leichter nach beiden Seiten abfliessen kann. Zweitens aber wirkt die Elastizität der beiderseitigen Flügelenden kompensirend einer Drehung aus der Gleichgewichtslage entgegen, indem bei einseitig stärkerem Druck sofort stärkere Krümmung erfolgt, welche wiederum leichteres Abfliessen der Luft gestattet und damit den Überdruck sofort mindert. Allzu grosse elastische Biegsamkeit des Flügels schadet freilich in anderer Beziehung, indem sie auch ausgleichend und mindernd auf die nützliche Oszillationsbewegung der Organe um ihre Längsaxe wirkt.

Um die Bedingungen des Zustandekommens der höchst auffallenden Bahnkurve, welche bei richtig belasteten Modellen von geeignetem Material geradezu überraschend ist, klarer zu stellen, als nur mit Worten geschehen kann und um gleichzeitig eine beiläufige Vorstellung der Wirkungsweise aller mitwirkenden Faktoren in einigen aufeinanderfolgenden Zeittheilchen zu geben, ist in der Fig. 3 Taf. VII der Versuch gemacht, diese Wirkungsweise im medianen Querschnitt des Organes schematisch vereinfacht darzustellen. Dieselbe bleibt übrigens für alle Querschnitte des Organes annähernd die gleiche. (Vgl. Fig.-Erkl.)

AB sei der mediane Querschnitt eines, in steil geneigter Stellung zu fallen beginnenden ebenen Modelles, dessen belastete Längskante sich in B, dessen Schwerpunkt sich bei

S befindet. Die Schwere strebe nun den Körper, respektive dessen Schwerpunkt S in der ersten Zeiteinheit bis zu dem Punkte f lothrecht nach abwärts zu bewegen. Während dieser Zeit übt aber gleichzeitig der der Bewegung genau entgegengesetzt gerichtete Luftwiderstand auf die Unterfläche des Organes einen Druck aus, dessen Angriffspunkt nach bekannten mechanischen Gesetzen ebenfalls der Punkt S ist und zwar wirke diese Kraft senkrecht nach aufwärts mit der durch die Linie w S repräsentirten Summe von Krafteinheiten.

Es wirkt von derselben aber nur die zur geneigten Fläche senkrecht auftreffende Komponente l S, während die, der Fläche parallel gerichtete n S verloren geht oder vielmehr nur als nicht berechenbare Reibung zur Geltung kommt. Die Komponente l S sucht den Punkt S in der Zeiteinheit nach m zu bewegen. Die beiden komponenten Geschwindigkeiten S f und S m erzeugen aber nach dem Parallelogrammgesetze eine Resultirende, welche die Richtung und Grösse SS' besitzt. In Folge dessen wird sich thatsächlich der Punkt S und ebenso der ganze Apparat in dieser Richtung bewegen.

Der Luftwiderstand greift nun aber nicht nur im Schwerpunkt an, sondern der eigentliche Angriffspunkt seiner Gesammtresultirenden liegt bei der angenommenen Bewegungsrichtung vor dem Schwerpunkte, bei dem Punkt a. In Folge dessen wird während des ersten Zeittheilchens nicht nur die resultirende fortschreitende Bewegung SS' gemacht, sondern gleichzeitig eine Drehbewegung um den Schwerpunkt erzeugt, indem sich die Platte in Gleichgewichtslage zur Resultirenden des Widerstandes einzustellen sucht. Ist der Schwerpunkt in S' angekommen, so hat der Querschnitt der Platte dementsprechend gleichzeitig eine kleine Drehung in der Richtung der kleinen Pfeile bei A und B ausgeführt und steht nunmehr in der Richtung A'B'.

Mit dem nunmehr beginnenden zweiten Zeittheilchen gestaltet sich die Wirkung der Kräfte folgendermassen:

Der Apparat tritt in Folge seiner Beharrung in dieses Zeittheilchen bereits mit einer gewissen Eigenbewegung ein. Diese Bewegung entspricht der Geschwindigkeit der mit dem Quadrat der Zeit beständig wachsenden Bewegung am

Schlusse des ersten Zeittheilchens. Der Einfachheit halber nehmen wir jedoch (wie für unendlich kleine Zeittheilchen) an, dass die Bewegung in einem Zeittheilchen immer die gleiche bleibe und dass in Folge dessen die erworbene Eigenbewegung im nächsten Zeitabschnitt die gleiche sei, wie die resultirende im ersten, also gleich sei S'e. Die resultirende Bewegung aus den beiden Komponenten von Fall und Eigenbewegung wäre in Folge dessen die Diagonale des Parallelogrammes S'o.

Dieser Bewegung wirkt nun wiederum direkt entgegen der Luftwiderstand und zwar hier in gesteigertem Masse. Es wächst derselbe nämlich erstens mit dem Quadrat des Steigerungsexponenten der Geschwindigkeit, was, da die Geschwindigkeitssteigerung entsprechend unseren anfänglichen Annahmen fast das doppelte betragen müsste, beinahe die vierfache Grösse des Widerstandes im ersten Zeitabschnitt (Sw) ausmacht, und zweitens in dem Verhältniss, als die Projektionsfläche des Apparates auf die Horizontale wächst. Die Projektionsfläche von A'B' verhält sich aber ebenso zur Projektionsfläche von AB wie die dieselbe darstellende Linie C'B' zu CB, also etwa wie 3 und 2. Also würde der Luftwiderstand während des zweiten Zeittheilchens $\frac{3}{2}$mal das Quadrat des Geschwindigkeitszunahme-Exponenten der Einheit betragen.

Die Grösse und Richtung dieses Widerstandes sei ausgedrückt durch die Strecke wS', welche man sich wiederum in die beiden Komponenten l'S' und n'S' zerlegt denken kann, wovon nur l'S' zur Wirkung kommt und den Punkt S' nach m' zu verschieben strebt. In dem Parallelogramm S'm'oS'' ergibt sich nun mit der Diagonalen S'S'' die Resultirende der Bewegung während des zweiten Zeittheilchens. Durch die schiefere Bahnrichtung wurde aber neuerdings der Angriffspunkt des Luftwiderstandes vor den Schwerpunkt verschoben und es erfolgt demgemäss eine weitere gleichsinnige Aufwärtsdrehung des Vorderrandes, deren Wirkung sich zu dem Reste der lebendigen Drehkraft aus dem ersten Zeittheilchen addirt. Am Ende des zweiten Zeitabschnittes befindet sich in Folge dessen der Apparat in der Stellung A''B''.

In dieser Weise setzt sich die Bewegung weiter fort, doch unterlasse ich es, sie hier weiter im Einzelnen zu analysiren.

b. Die Horizontalbewegung.

Was die Seitenabweichung von der typischen, horizontal projizirt geradlinigen Bahn anlangt, welche, indem sie in der Regel in gleichem Sinne stattfindet, ein schraubenförmiges Abwärtsgleiten herbeiführt, so hängt die Grösse derselben und damit der Radius der einzelnen Stücke der Schraubenbahn, wenn keine Oszillationen um die Längsaxe stattfinden, von der Ungleichheit oder Unsymmetrie der Flächenvertheilung beiderseits der durch den Schwerpunkt gehenden Queraxe ab, indem die Zahl der vom Luftwiderstand getroffenen Flächenelemente, oder bei gleicher Zahl derselben die Summe ihrer Entfernungen von dem Schwerpunkt (also der wirksamen Hebelarme) beiderseits ungleich ist.

Bei sonst gleichgrossen und symmetrischen Flügelhälften kann dieser Unterschied bei der Funktion erst entstehen durch ungleiche elastische Biegsamkeit der beiden Hälften, indem die eine Flügelseite unter demselben Luftwiderstand geringere Biegungsfestigkeit besitzt, als die andere. Die biegsamere Hälfte nimmt in Folge dessen eine stärkere Krümmung an und die wirksame Horizontalprojektionsfläche wird dadurch erstens verkleinert, zweitens wird durch die stärkere Neigung ein leichteres seitliches Abfliessen der Luft ermöglicht. Die biegsamere Flügelhälfte entspricht also im ganzen einer verkleinerten Hälfte, auf welche der Luftwiderstand schwächer einwirkt als auf die antagonistische grössere. Je nach diesen Verhältnissen wird sich die Längsaxe des Organs ebenfalls verschieden einstellen, entweder ganz horizontal oder mit der Horizontalen mehr oder weniger grosse Winkel einschliessend. Im letzteren Falle nun, welcher meist zutrifft, wird das Organ nicht nur in der Richtung seiner Queraxe, sondern auch in der Richtung seiner Längsaxe sich bewegen, respektive es wird überhaupt nach der Richtung der stärksten Neigung seiner Fläche eine resultirende Bewegung stattfinden.

Ausserdem werden die horizontalen Luftwiderstandskomponenten, welche das Organ treffen, im letzteren Fall

aber auch in Folge der Nichtkompensirung ihrer statischen Momente in Bezug auf die im Raum vertikale Schwerpunktsaxe eine Drehung des Organes um eben diese Axe erzeugen, indem die aufwärts gerichtete grössere und wirksamere Hälfte der kleineren, etwas abwärts geneigten vorauseilt.

Je nach der Grösse des einerseitigen Überschusses der statischen Momente wird eine mehr oder minder rasche Drehung um die im Raume senkrechte Schwerpunktsaxe zu Stande kommen, und diese wird, da die drehenden Kräfte dauernd einwirken, sich etwas beschleunigen und in Folge dessen unter abnehmendem Radius der Bahn vor sich gehen. Die Krümmung der Bahn wird also bis zu einem gewissen Grade zunehmen und so eine nach unten engere Spirale entstehen.

Die Krümmung muss so lange zunehmen, bis der, der rascher sich bewegenden Flügelhälfte entgegenwirkende Luftwiderstand der Beschleunigung der Drehbewegung das Gleichgewicht hält. Von diesem Momente an wird die Schraubenbewegung (bei gleichmässiger Fallgeschwindigkeit) eine gleichförmige, d. h. der Radius, welchen jedes Bahnelement mit der Axe der Bewegung besitzt, sowie sein Steigungsverhältniss bleiben sich dauernd gleich.

Absolute Gleichförmigkeit kann indessen auch hier, wie überall, wo Schwerkraft und Luftwiderstand zusammenwirken, nicht eintreten, sondern nur asymptotische Annäherung an wirklich gleichförmige Bewegung.

Wo deutliche Oszillationen gleichzeitig andauern, wird die Bahn im allerhöchsten Grade komplizirt und zwar sowohl in vertikaler wie horizontaler Projektion. In letzterer entsteht eine mehr oder weniger polygonalspiralige Bahn, wie sie gelegentlich des ersten Versuchsorganes von Zanonia javanica bereits geschildert wurde. In anderen Fällen, wo keine so starken Oszillationen gemacht werden, tritt diese Erscheinung mehr zurück.

Der Gesammtverlauf der weit überwiegend spiraligen Bahnen ist also je nach dem verschiedenen Verhalten der Organe ein überaus verschiedener.*)

*) Die ganze Bewegung dieser höchst ausgezeichneten Flug-Apparate hat eine überraschende Aehnlichkeit mit der Flugbewegung

c. Einiges experimentelle.

Behufs Vergleichs von Platten verschiedener Länge bei gleicher Breite und gleicher Schwerpunktslage wurden mehrere Versuchsreihen angestellt, von welchen ich eine als die charakteristischste hier mittheile. Die Modelle waren alle rechtwinklig, 50 mm breit und zwischen 25 und 150 mm lang. Die Nuss wurde durch 10 mm breite und $12^1/_2$—75 mm lange Kartonstreifen dargestellt, welche längs einer Längskante der aus feinem und gleichzeitig möglichst steifem Briefpapier bestehenden Flügelplatte aufgeklebt wurden. Die mediane Queraxe der Kartonstreifen fiel dabei mit der medianen Queraxe der Flügelplatte zusammen und Fläche und Gewicht der beiden Theile standen immer im gleichen Verhältniss. In Folge dessen war auch die Lage des Schwerpunktes bei allen Platten die gleiche. Die durch den Schwerpunkt abgeschnittenen Stücke der Queraxe verhielten sich wie $\frac{12{,}75}{37{,}25} = \frac{1}{2{,}92}$.

Die Gewichtsschwankungen waren gering, und betrugen nicht mehr als etwa $^1/_2$ mgm Über- oder Untergewicht. Das berechnete Gewicht ist ein mittleres und entspricht genau demjenigen des Modells Nr. 4. Es wurden immer mehrere gleiche Modelle verfertigt und aus diesen, welche sich ziemlich verschieden verhielten je eines, und zwar dasjenige, welches unter gleichen Verhältnissen die höchste Leistung zeigte, ausgewählt. Es beeinflussen nämlich, wie schon früher

---

vieler Vögel und Schmetterlinge und zwar der grossflügeligen unter ihnen. Unter den Schmetterlingen speziell der Tagfalter. Das Kreisen ziehen in ganz unbeweglicher Stellung, wie es namentlich bei manchen Raubvögeln mit grossem Flugvermögen schön zu beobachten ist, beruht auf analoger Vertheilung des Gewichts und der wirksamen Widerstandsflächen, welche das lebendige Thier freilich in hohem Grade willkürlich verändern und verstellen kann. Ebenso die Erzeugung zahlreicher kleiner sekundärer, nach abwärts konvexer Kurven, welche man ebenfalls ähnlich bei manchen Vögeln und Schmetterlingen beobachtet. Die Möglichkeit, dass Körper ohne Eigenbewegung bei geeigneter Konstruktion den Luftwiderstand in dem angegebenen Grade auszunützen vermögen, scheint mir dafür zu sprechen, dass die Ausnützung desselben durch die lebenden Thiere eine bedeutend höhere sein dürfte, als man nach der gewöhnlichen Widerstandsformel anzunehmen pflegt.

bemerkt, verschiedene, kaum im einzelnen zu kontrolirende Verhältnisse die Leistungsfähigkeit der Apparate so bedeutend, dass man auch aus gleichem Material hergestellte, äusserlich gleiche Apparate nicht ohne weiteres vergleichen kann. Beispielsweise entstehen durch das Aufkleben der belastenden Kartenstücke beim Trocknen ganz unvermeidliche kleine Spannungen und Faltungen des Flügels, von welchen der Grad seiner Steifheit zum Theil bedingt wird. Diese sind bei den einzelnen Modellen nie ganz gleich. Je steifer aber der Flügel wird, um so leistungsfähiger wird im Allgemeinen unter sonst gleichen Umständen ein Modell. Die Modelle waren sämmtlich in der Richtung der Queraxe eben, resp. so eben, als es bei derartigem Material möglich ist, welches schon durch die Ausdünstung der Hand in kurzer Zeit Krümmungen annimmt. Sie wurden aus 6 m Fallhöhe in quer senkrechter Stellung fallen gelassen. Die angegebenen Fallzeiten sind die grössten beobachteten.

Für die Verlängerung der Modelle ergibt sich die Grenze in dem verwendeten Material. Papier erschien relativ als bestes. Alles steifere Material ist zu schwer. Modell Nr. 5 überschritt bereits die zulässige Grenze, in Folge dessen sinkt gegen Erwarten die Leistungsfähigkeit.

Die Resultate dieser Tabelle sind so klar, dass dazu nichts weiter zu bemerken ist.

In der nächstfolgenden Tabelle II gebe ich die Resultate einer Versuchsreihe mit 4 Modellen, welche sämmtlich an Gestalt, Grösse, Gewicht, Material und Schwerpunktslage dem Organ Nr. 4 der vorigen Tabelle entsprachen. Dieses selbst figurirt hier unter Nr. 1. Die Tabelle soll das ausserordentlich verschiedene Verhalten äusserlich ganz gleicher Modelle darthun. Die beiden Abtheilungen a und b geben Resultate, welche je mittelst des nämlichen Modelles erzielt wurden, und zwar bei a in flachem Zustande des Flügels und bei b in schwacher Krümmung in der Richtung der Queraxe, welche annähernd im medianen Querschnitt in der Figur 4 Taf. VII dargestellt ist. Diese Krümmung wurde mittelst der Hand gegeben durch wiederholtes Umbiegen. Die Fallhöhe betrug wiederum 6 m und die Organe wurden ebenso wie bei dem vorigen Versuch fallen gelassen.

Tab. I.

Modell-nummer	Verhältn. von $\frac{\text{Länge}}{\text{Breite}}$ in mm	Gewicht in mgm	Flächeninh. in qmm	Mittlerer Neig.-Winkel d. Queraxe z. Horiz.	Fallzeit auf 6 m in Sek.	Beob. Fall-geschw. in m	Berechn. Fall-geschw. für 3 = 1 in m	Leist-ungs-grösse	Gestalt der Bahn	Gestalt u. Zahl der Oszillationen
1	$\frac{25}{50}$	97,8	1250	c. 32^0	4,8	1,25	1,09	0,87	sehr steile Spirale	Kaum erkennbar, nur anfangs.
2	$\frac{50}{50}$	195,7	2500	c. 22^0	7,2	0,83	„	1,31	steile Spirale	Wenige stärkere O.
3	$\frac{75}{50}$	293,6	3750	c. 19^0	9,4	0,64	„	1,7	mässig steile Spirale	Mehr schwächere O.
4	$\frac{100}{50}$	391,5	5000	c. 15^0	12	0,5	„	2,18	weite sanft geneigte Spirale	Viele schwache O.
5	$\frac{150}{50}$	587,2	7500	c. 15^0	10,8	0,55	„	1,98	weite sanft geneigte Spirale	Viele flache wenig erkennbare O. (Seitenränder des Modells stark aufgebogen).

Tab. II.

Modell-nummer	a. Flügel flach.			b. Flügel quergekrümmt.		
	Fallzeit in Sek.	Leistungs-grösse	Zahl u. Art der Oszillationen.	Fallzeit in Sek.	Leistungs-grösse	Zahl u. Art der Oszillationen.
1	12	2,18	viele kurze O.	13	2,37	viele kurze O.
2	8,8	1,6	ziemlich undeutliche O.	8,8	1,6	ziemlich undeutliche O.
3	3,2	0,58	1 grosse sekundäre Kurve, deren tiefster Punkt bei $4^1/_2$ m Fallhöhe, dann 1—$1^1/_2$ m hohes Wiederaufsteigen.	6,6	1,2	wenige stärkere O.
4	5,2	0,948	2 grosse sekundäre Kurven.	12,4	2,25	viele schwache O.

Charakteristisch ist in dieser Tabelle die bedeutende Steigerung der Leistungsgrösse mit der Flügelkrümmung. Alleinige Ausnahme macht Modell Nr. 2, dessen Leistungsfähigkeit auffallender Weise ganz gleich bleibt. Es erklärt sich dies daraus, dass mit der Biegung des Flügels die vorher vorhandene grössere Steifheit verloren ging. Was durch die Krümmung an Fähigkeit zu erhöhter Oszillationsbewegung gewonnen wurde, ging durch die grössere Biegsamkeit wieder verloren. Die Zunahme der Leistungsgrösse bei den übrigen Formen zeigt dabei durchaus keine Regelmässigkeit. Ganz enorm ist sie bei dem Modell Nr. 4, wo sie auf fast das $2^1/_2$fache steigt. Auffallend gering ist die Leistungsgrösse von Modell Nr. 3 in flachem Zustande. Das bis zu $1^1/_2$ m Höhe beobachtete Wiederaufsteigen ist selbstverständlich gerade durch die vorher erlangte grosse Fallgeschwindigkeit bedingt.

XI. Haupttypus.

Die länglich plattenförmigen Flugorgane mit einer belasteten Kurzkante.

(Taf. I Fig. XI, 1—3; Taf. II Fig. 10 u. 11; vgl. Fig.-Erkl.)

Die Organe stellen typisch dünne ebene Platten von länglichem Umriss mit in der Richtung der Längsaxe stark verschobenem Schwerpunkt dar. Sie bestehen aus einer Nuss von verschiedener Gestalt, welche auf einer Seite mit einem sehr verlängerten, mehr oder weniger symmetrisch gestalteten, steifen häutigen Flügel versehen ist. Öfter kommen schwache Flächenkrümmungen des Flügels vor. Die Organe besitzen in Bezug auf keine ihrer 3 Körperaxen stabile Gleichgewichtslage. Die Fallbewegung findet unter beschleunigten Drehungen in doppeltem Sinne statt, nämlich erstens in mehr oder weniger senkrechter Richtung um die mit der Horizontalen einen sehr spitzen Winkel einschliessende Körperlängsaxe und zweitens in horizontaler Richtung um eine, ihren Ort im Körper beständig wechselnde, im Raume senkrechte Schwerpunktsaxe, welche die Körperlängsaxe unter dem Komplementswinkel des vorigen schneidet. Die sehr ungleiche Flächengrösse beiderseits der Queraxe bedingt beim Fall längsgeneigte Lage, in welcher das Organ zunächst in Rotation um seine Längsaxe geräth. Sodann entstehen ebenfalls in Folge jener Flächenvertheilung horizontal drehende Kräfte, welche beschleunigte Rotation um eine im Raum vertikale Schwerpunktsaxe sowie einen bedeutenden der Rotation entgegen gerichteten Luftwiderstand erzeugen. Letzterer dreht mit seiner senkrecht nach abwärts gerichteten Komponente den Flügel abwärts und erzeugt so eine, der horizontalen sich mehr oder weniger nähernde, stabile Stellung der Längsaxe. Dadurch ist die

Möglichkeit einer besseren Ausnützung der Flügelfläche gegeben, welche im Übrigen durch die mehr weniger senkrechte, beschleunigte Rotation um die Längsaxe erhöht wird. Die Bahn des Schwerpunktes in ruhiger Luft ist eine geradlinige, lothrechte. Die Fallgeschwindigkeit ist im Verhältniss zur Flächenentwicklung durch die beschleunigte Vertikalrotation nicht unbedeutend verzögert.

Die Beispiele für diesen Typus scheinen nicht zahlreich zu sein. Von Früchten wären zu nennen diejenigen von Fraxinus (Oleac.) und Plenckia populnea (Celastrin.). Von Früchtchen die von Liriodendron tulipifera (Magnoliac.). Möglicherweise gehören die merkwürdigen Früchte der Dipterocarpeen, welche zu prüfen ich nicht in der Lage war, hierher.

Es verbindet der XI. Haupttypus die Bewegung des folgenden XII. mit derjenigen des IX. Der Vorgang ist in Folge dessen sehr komplizirt.

Der Schwerpunkt befindet sich meist etwa im untern Drittel der Organe, oder noch etwas weiter gegen das Nussende verschoben. Die Körperaxen fallen bei der Bewegung mit den Raumaxen nicht zusammen.

Die Anordnung der Hauptträgheitsaxen der Körper ist ähnlich wie bei den unbelasteten länglichen Platten. Die Längsaxe (z Fig. XI, 1, Taf. I) der Organe, resp. ihrer Modelle, ist die von der mittleren Axe abweichendste Hauptträgheitsaxe und daher theoretisch die stabilste; die zur Fläche des Organes vertikale Axe (y Fig. XI, 1 u. 2, Taf. I) ist theoretisch die zweite stabile, deren Stabilität aber geringer. In Bezug auf die erstere Axe besitzen die Organe das geringste Trägheitsmoment.

Von Raumaxen, welche den Schwerpunkt der Körper in sich aufnehmen, ist die vertikale (3 Fig. 1 Taf. VI) die wichtigste, da um sie die horizontale Drehung des Körpers,

und zwar in schiefwinkliger Stellung seiner Längsaxe vor sich geht. Einzig und allein zu dieser, im Raum vertikalen Schwerpunktsaxe nimmt überhaupt der Körper, resp. seine Längsaxe beim Drehen stabile Gleichgewichtsstellung ein. Dieselbe ist im Raume unbeweglich, im Körper dagegen wechselt sie fortwährend die Stellung, resp. die beiden anderen Körperaxen wechseln ihre Stellung zu derselben.

Früchtchen von Liriodendron tulipifera (Magnoliac.).

An einem von den Seiten zusammengedrückten, kleinen platten Nüsschen von c. 6 mm Breite und Länge und 1 mm Dicke setzt sich, mit seiner Fläche senkrecht zu der des Nüsschens gestellt, der lange schmale Flügel an, welcher etwas schiffchenförmig konkav gekrümmt, dünn und steif ist. Derselbe ist c. 26—29 mm lang und im Umriss lineallanzettlich, an der breitesten Stelle in der Mitte $6^1/_2$—7 mm breit.

Der Schwerpunkt befindet sich durchschnittlich an der Grenze des untersten Dritttheiles der im Ganzen meist etwa 35 mm langen Früchtchen (vgl. Fig. 10, a u. b Taf. II). Doch schwankt seine Lage ziemlich stark, wie aus folgenden Massen hervorgeht: Unter 4 Früchtchen massen zwei 35 mm Länge, und der Schwerpunkt befand sich bei $\frac{12}{23}$ der Längsaxe, ein drittes mass 35 mm und der Schwerpunkt lag bei $\frac{10}{25}$; ein letztes mass 33 mm und sein Schwerpunkt lag bei $\frac{9{,}5}{23{,}5}$.

Die Organe fallen aus einer Höhe von 3 m, wenn man sie aus horizontaler oder mit der Nuss nach oben gerichteter Stellung fallen lässt, ziemlich regelmässig in 2, 2—2, 4 Sek. zu Boden, aus senkrechter Fallstellung mit der Nuss nach unten gerichtet dagegen in sehr verschiedenen Zeiträumen von 1,4—2,2 Sekunden. Dieses Schwanken hängt an dem Umstande, dass sie aus der letzten Stellung oft erst sehr spät oder fast gar nicht in dem angegebenen Fallraum zum Drehen kommen.

Aus der ersten Fallstellung, welche die natürliche ist, da die Früchtchen ja mit der Nuss an dem verlängerten

aufrechten Fruchtboden festsitzen und von ihm sich ablösen, gehen sie rasch nach 60—90 cm Fallraum in Drehung über und fallen dann sehr gleichmässig. 6 m Fallraum wurden von einem Versuchsorgan in 4,8 Sek. durchfallen, hievon die ersten 3 m in 2,4 Sek. und die letzten 3 m ebenfalls in 2,4 Sek.

In anderen Fällen beobachtete ich auch Fallzeiten von 5,4 und 6 Sek. auf 6 m Höhe. Die gleiche Fallzeit für die beiden aufeinanderfolgenden Fallräume von je 3 m erklärt sich daraus, dass anfangs stärkere Fallbeschleunigung eintritt und dann nach Beginn der Rotation mit zunehmend geneigter Lage wiederum Verzögerung. Mit Eintritt der endgültigen rotirenden Bewegung wird die Fallgeschwindigkeit sehr rasch gleichmässig und erhält sich nun ohne bemerkliche Schwankungen auf gleicher Höhe.

Die Drehung selbst geht vor sich in einer durchschnittlichen Neigung der Längsaxe zur horizontalen von ungefähr 23—25°, doch zu schnell um den Vorgang mit blosem Auge deutlich zu beobachten. Die Zahl dieser Horizontaldrehungen beträgt c. 6—8 in der Sekunde. Ausser dieser Rotation findet noch eine zweite um die Längsaxe statt, welche an den natürlichen Objekten nur andeutungsweise wahrgenommen werden kann.

Die Fallbahn selbst ist nach Beginn der horizontalen Rotation eine lothrechte ohne irgendwie bemerkliche Seitenabweichungen.

Der Uebergang von Beginn des Falles bis zur Rotation lässt sich an den Früchtchen selbst nicht wohl beobachten, indem sie bis dahin einen, für ihre geringe Grösse zu bedeutenden Fallraum zurücklegen.

Früchte von Fraxinus excelsior (Oleac.).

Die länglich lanzettliche, flach bikonvexe Nuss, welche durchschnittlich 21 mm lang, $6^1/_2$ mm breit und 2 mm dick ist, setzt sich in ihrer oberen Hälfte in einen etwas verbreiterten, lanzettlichen Flügel fort. Letzterer überragt die Nuss um fast das Doppelte und ist in seiner Mitte etwas unterhalb des obersten Drittels der ganzen Frucht am breitesten, durchschnittlich c. 9 mm. Der Flügel ist entweder ganz eben, oder etwas gekrümmt, entweder der Länge nach,

oder etwas schraubenförmig oder auch ziemlich unregelmässig. Der Schwerpunkt befand sich durchschnittlich 12 mm vom untersten (Nuss-) Ende der mir vorliegenden, meist etwa 40 mm langen Organe entfernt. Bei 3 normal entwickelten Organen befand er sich beispielsweise im ersten Fall auf 40 mm Gesammtlänge bei $\frac{12{,}5}{27{,}5}$, im zweiten bei gleicher Gesammtlänge bei $\frac{12}{28}$ und im dritten bei 39 mm Gesammtlänge bei $\frac{11{,}5}{27{,}5}$ (vgl. Fig. 11 Taf. II).

Aus 6 Meter Fallhöhe und natürlicher Fallstellung (mit dem Flügelende senkrecht nach unten gerichtet) fallen die Organe durchschnittlich in 2,8 Sek. zu Boden, indem sie nach $1^1/_2 - 2$ m Fallraum ähnlich wie die Früchtchen von Liriodendron, jedoch in etwas rascherem Tempo sich zu drehen beginnen. Manchmal freilich nehmen sie eine sehr steile oder ganz senkrechte Fallrichtung an und kommen selbst bei 6 m Fallhöhe nicht zur Rotation. In letzterem Fall wird der ganze Fallraum in 1,0—1,2 Sek. zurückgelegt.

Das Gewicht eines Versuchsorganes, welches dem durchschnittlichen Gewicht aus einer grösseren Anzahl von Früchten nahe kam, betrug 0,152 gm, wovon die Nuss allein 0,112 gm und der Flügel 0,04 gm wog. Die Gesammtfläche des Organs betrug 281 qmm, hievon kamen auf die Nuss 114 qmm und auf den Flügel 167 qmm. Die Länge des ganzen Organs betrug 40 mm und der Schwerpunkt theilte die Längsaxe nach dem Verhältniss $\frac{12}{28}$.

Das Organ durchfiel 6 m Fallhöhe in 2,8 Sek. und zwar je 3 m in 1,4 Sek. Dies macht also $\frac{3}{1{,}4} = 2{,}14$ m auf die Sekunde und stellt nach dem Charakter der Bahn die gleichmässig andauernde Fallgeschwindigkeit dar.

Führen wir die oben angegebenen Grössen für Flächeninhalt und Gewicht in unsere Formel ein, analog unserem Vorgehen bei den übrigen drehenden Formen, so erhalten wir, wenn wir 3 in Anbetracht der konvexen Nuss schätzungsweise = 1 annehmen,

$$v = \sqrt{\frac{19620 \cdot 152}{0{,}001293 \cdot 281}}$$

$$v = 2{,}865 \text{ m.}$$

Nachdem die beobachtete Geschwindigkeit nur 2,14 m beträgt, sehen wir hier eine um das 1,34 fache hinter der theoretischen zurückbleibende Fallgeschwindigkeit.

Ein zweites Versuchsorgan hatte 265 qmm Flächeninhalt und wog 0,134 mgm. Seine grösste Länge betrug 39 mm bei 9 mm grösster Flügelbreite. Der Schwerpunkt schnitt die Längsaxe nach dem Verhältniss $\frac{11{,}5}{27{,}5}$. 6 m wurden in 3 Sek. durchfallen, davon je 3 m in 1,5 Sek., also betrug die grösste Fallgeschwindigkeit 2 m pro Sekunde. Die theoretische Fallgeschwindigkeit aus Gewicht und Fläche für 3 = 1 beträgt 2,77 m, die beobachtete somit um das 1,385fache weniger.

Im übrigen ist noch zu bemerken, dass die erwähnten schwachen Krümmungen des Flügels, wie sie bei Fraxinusfrüchten überaus häufig, aber in ziemlich ungleicher Form vorkommen, für die raschere Einleitung des Vorganges nützlich sind. Für die Gesammtfallzeit wird also damit etwas gewonnen. Für die schliessliche gleichmässige Geschwindigkeit aber natürlich nicht, eher tritt hier in Folge der Krümmungen eine minimale Erhöhung ein.

Die Drehlage der Eschenfrüchte ist in der Regel ein wenig stärker geneigt, wie bei Liriodendron, meist beträgt der Winkel der Längsaxe c. 26—28° zur Horizontalen. Die Bewegung der natürlichen Objekte direkt zu beobachten ist wegen der grösseren Fallgeschwindigkeit noch schwieriger, wie bei Liriodendron. Sie lässt sich ebenfalls nur mittelst grösserer Modelle verfolgen. Die Bahn des Schwerpunktes ist wie bei Liriodendron mit Beginn der Rotation eine geradlinig lothrechte, welche im Falle von Störungen durch seitlich einwirkende Luftströmungen einfache Abweichungen in der Richtung der angreifenden Kraft zeigt. Zur Drehrichtung gegenläufige Spiralbahnen, wie beim folgenden Typus, kommen hier nicht vor.

Leistungsgrösse des Typus.

Dieselbe ergibt sich aus einigen, im nächsten Abschnitte mitzutheilenden Versuchen mit Modellen, sowie aus den bereits mitgetheilten Beobachtungen und Berechnungen an Früchten von Fraxinus excelsior. Die Leistungs-Grösse schwankte danach (für $\zeta = 1$) zwischen 1,106 bei einem der Modellversuche und 1,385 bei einer der Eschenfrüchte. Möglicherweise kann sie noch etwas höher ansteigen, doch ist die angegebene Grösse die höchste bei dem XI. Typus überhaupt beobachtete. Sie bleibt zwar, wie sich ebenfalls aus der, im nächsten Abschnitt mitgetheilten kleinen Tabelle ergibt, hinter der Leistung des IX. Typus unter sonst gleichen Umständen (Gewicht und Fläche) nicht unerheblich zurück, ist indessen immerhin ziemlich bedeutend. Ihre Leistungsfähigkeit verdanken die hierhergehörigen Formen der mehr oder weniger vertikalen Rotation um die Längsaxe, gerade wie diejenigen des IX. Typus. Dass sie weniger leisten als ihnen an Gewicht, Flächengrösse und Flächengestalt gleiche Formen des letzteren, auch wenn diese sich zum Horizont gleich steil oder sogar noch steiler einstellen, beruht, wie in der Mechanik des Vorganges ausgeführt werden wird, auf der zum Theil gegensinnigen Vertikaldrehung. Dieselbe kommt dadurch zu stande, dass die vertikale Axe der Bahn durch den Schwerpunkt des Körpers selbst geht.

Zur Mechanik des Vorganges.

Die Einstellung wie die Bewegung selbst gehen bei den natürlichen Objekten sehr rasch vor sich. Um den Vorgang direkt verfolgen zu können, sind daher Fallversuche mit vergrösserten leichten Modellen, deren Flächen verschieden gefärbt sind, unerlässlich. Der Vorgang selbst ist bei den Organen von Fraxinus und Liriodendron ganz gleich. Die Liriodendronfrüchtchen, resp. ihre Modelle, erwiesen sich durch ihre Krümmung und Leichtigkeit als besonders geeignet für die Beobachtung. Das hier Vorgetragene bezieht sich in Folge dessen auch speziell auf sie.

Es wurde ein Modell hergestellt, aus hinreichend steifem,

nicht zu schwerem weissen Carton. Der Flügel in der Grösse von 100 mm Länge auf 20 mm Breite, von länglich lanzettlicher Gestalt, wurde der Länge nach ein wenig gekrümmt und auf der konkaven Seite kräftig roth gefärbt. Die Nuss des Organs, aus einer kleinen Korkplatte geschnitten, wurde an einem Ende mittelst Siegellackes auf der konkaven Seite befestigt und dann die richtige Gewichtsvertheilung hergestellt, so dass die Lage des Schwerpunktes derjenigen der natürlichen Organe entsprach. Dieses Modell funktionirte genau wie die natürlichen Objekte.

Der Vorgang des Ueberganges zur Rotationsstellung und zur Rotation selbst lässt sich nur dann hinreichend deutlich mit dem Auge verfolgen, wenn man das Modell aus senkrechter Stellung mit der Nuss nach unten gerichtet und ausserdem mit der konkaven Seite von sich abgewendet (in Stellung a Fig. 5 Taf. VII) fallen lässt, so dass man im Voraus genau weiss, welchen Weg es einschlagen wird.

Dasselbe fällt erst senkrecht hinab, nimmt aber in Folge seiner Flächenkrümmung, analog den schon mehrfach geschilderten Vorgängen, rasch eine zunehmend schiefe Richtung an, indem es sich von dem Experimentator hinweg nach vorwärts bewegt, bis es schliesslich nach einer aufwärts konkav gekrümmten Bahn in mehr oder weniger horizontaler Stellung (b der gleichen Figur) anlangt, wobei die konkave roth gefärbte Seite nach aufwärts gekehrt ist.

Hier kann man nun von oben herab ganz deutlich sehen, wie allmählich das Modell in Schwanken um seine Längsaxe geräth und schliesslich, nach einer letzten besonders starken Schwankung, mit einer Drehung um die Längsaxe (z Fig. 6 Taf. VII) plötzlich nach der entgegengesetzten Seite umkippt, so dass nunmehr die bisher untere (konvexe) weisse Flügelfläche sich nach aufwärts dreht. Diese Drehung setzt sich dann dauernd fort. In demselben Augenblick aber beginnt auch gleichzeitig horizontale Rotation um eine im Raum vertikale, durch den Schwerpunkt gehende Axe (ξ der gleichen Figuren). Beide Drehungen dauern an und beschleunigen sich rasch. Die letztgenannte ist ohne weiteres sichtbar. Die Drehung um die Längsaxe dagegen ist nur dadurch mit voller Sicherheit zu erkennen, dass, von oben

herab gesehen, abwechselnd die rothe und weisse Flügelseite sichtbar wird. Dabei geht die Rotation um die durch den Schwerpunkt gehende, vertikale Raumaxe im Verhältniss zur Rotation um die Körperlängsaxe immer nach derselben Richtung vor sich und zwar nach der entgegengesetzten Richtung, nach der das Modell zuerst umgekippt war. Es entspricht dies der gleichen, nach welcher die letzte starke Schwankung stattfand.

Die aufwärts drehende Längskante der, dem Experimentator zugekehrten grösseren (Flügel-) Hälfte des Modelles schreitet also bei der Rotation nach vorwärts, ganz ähnlich, wie bei der Bewegung des IX. Typus die aufwärts drehende Kante nach vorwärts sich bewegt.

Während der Drehung machte die Längsaxe des Versuchsmodelles schliesslich einen Winkel von etwa 23^0 mit der Horizontalen, und von oben gesehen erblickt man bald nach Beginn der Drehung drei weisse Strahlen oder ein weisses Kreuz in rothem Feld, was zeigt, dass auf jede horizontale Umdrehung etwa 3—4 Umdrehungen um die Längsaxe kamen.

An dem grösseren Modell war dieser letztere Vorgang übrigens nicht weiter zu kontroliren, da bei der geringen Höhe des für derartige Versuche zur Verfügung stehenden Fallraumes dasselbe nur ein ganz kurzes Stück hindurch regelrecht funktioniren konnte. Es wurden hiezu kleinere leichte Papiermodelle benützt, welche übrigens genau dieselbe Gestalt besassen und ebenso gefärbt waren wie das grosse. Der optische Eindruck des weissen Kreuzes im rothen Felde wurde bald nach Beginn der Bewegung erzeugt, nach und nach wurde daraus erst ein dreistrahliger Stern, dessen Lage etwas wechselte.

Beobachtet man den Vorgang aus gleicher Höhe von der Seite aus, so erkennt man, wie nach Annahme mehr oder weniger horizontaler Richtung der Bahn und ebensolcher Stellung des Modelles, mit der Verlangsamung der fortschreitenden Bewegung und während der Schwankungen um die Längsaxe ein zunehmend beschleunigtes Herabsinken des Modells und gleichzeitig des vorausgehenden Nusstheiles desselben stattfindet, und dass dieser letztere Vorgang

(welcher eine Drehung des Modelles um eine im Raume horizontale Schwerpunktsqueraxe darstellt) während des Beginnes der doppelsinnigen Drehung anfangs noch zunimmt bis zu einer Neigung der Längsaxe von c. $50-55^0$ zum Horizont. Dann nimmt dieser Winkel wieder ab bis zu seiner definitiven Grösse, welche an den beobachteten Modellen etwa zwischen 20^0 und 25^0 lag.

Mechanisch erklärt sich der ganze Vorgang folgendermassen:

Die zunehmende Krümmung der anfänglichen Fallbahn gegen die Horizontale wird auch hier wieder bedingt durch den mit beschleunigter Fallgeschwindigkeit mit dem Quadrat steigenden Luftwiderstand gegen die vorausgehende Parthie der unteren Fläche. Die Lage des Angriffspunktes erzeugt um die horizontale Queraxe des Organs aufwärts drehende Kräfte. Ist keine Krümmung des Flügels vorhanden, so genügt diese drehende Kraft allein, aber erst nachdem ein grösserer Raum durchfallen und so eine grössere Geschwindigkeit erlangt ist. Ist der Flügel ausserdem der Länge nach gekrümmt, so unterstützt die hiedurch erzeugte zweite wirksame Kraftkomponente als gleichsinnig die angestrebte Drehung und letztere wird bedeutend beschleunigt.

Ist der Apparat in horizontaler Lage angekommen, so beginnen nun in Folge der Labilität derselben die Seitenschwankungen, als wollte er nach rechts oder links umkippen. Diese Schwankungen nehmen aber zu, da mit Verlangsamung der horizontalen und Beschleunigung der neuerdings zunehmenden vertikalen Fall-Bewegung der Luftwiderstand gegen die untere Fläche wächst und jedes Schwanken in Folge der damit verbundenen seitlichen Verschiebung des Angriffspunktes einen verstärkten Rückstoss zur Folge hat. Diese Rückstösse wirken aber jedesmal mit wachsender Grösse ihres Momentes drehend um eine, durch den Schwerpunkt gehende, im Raume senkrecht gedachte Axe, da ja wegen der Lage des Schwerpunktes im ersten Drittel des Apparates der drehenden Kraft, mit welcher die horizontale Komponente die hinteren zwei Drittel der Unterfläche trifft, keine sie vollständig kompensirende entgegenwirkt. Man sieht dem entsprechend den Seitenschwankungen parallel

gehende schwache Drehbewegungen um die genannte senkrechte Axe stattfinden, welche ebenfalls einen immer grösseren Ausschlag zeigen. Schliesslich geräth der Apparat durch eine besonders kräftige Seitenschwankung, öfter die 3.—5. wahrgenommene, in quer steil geneigte Lage und nun geht er plötzlich, indem die horizontal drehenden Kräfte dadurch bedeutend anwachsen, in rasche Rotation um die senkrechte Schwerpunktsaxe über.

Das längere (Flügel-) Ende dreht sich dabei nach der Seite, auf welcher die Längskante des Modells sich zuletzt abwärts geneigt hatte, gleichzeitig wird aber auch diese letzte seitliche Neigung wieder rückgängig. Die abwärts geneigte Seitenkante wird durch die senkrecht nach oben gerichtete Komponente des Luftwiderstandes nämlich so rasch aufwärts um die Längsaxe gedreht, dass die dadurch erzeugte lebendige Kraft ausreicht, um den ihr während einer halben Drehung entgegenwirkenden Luftwiderstand zu überwinden. Damit haben wir aber wieder genau dieselbe Drehung, wie wir sie bei dem Typus der „länglichen Platten“ so ausgezeichnet auftreten sahen. Nur tritt sie hier nicht wie dort, unter wenigstens ursprünglich horizontal geradliniger Fortbewegung des Apparates auf, sondern fast sofort verbunden mit gleichzeitiger Rotation um eine, im Raum unbewegliche, senkrechte, im Körper des Apparates stark exzentrisch liegende und in jedem Momente ihren Ort wechselnde Schwerpunktsaxe (ξ).

Ganz genau genommen muss übrigens auch hier der Beginn der Bahn des Schwerpunktes eine sich verengernde Spirale darstellen, nur ist die Krümmung gleich anfangs sehr bedeutend, respektive der Radius derselben sehr klein, und letzterer verkürzt sich sehr rasch, so dass er in der Horizontalprojektion der Bahn gleich Null wird. Die Spirale geht aber damit in eine geradlinige Vertikalbewegung über. Direkt mit dem Auge diese anfängliche Spiralbewegung sicher zu erkennen ist nicht gut möglich, dieselbe muss aber theoretisch angenommen werden.

Die letztere Drehung, respektive der durch ihre Beschleunigung erzeugte Luftwiderstand bewirkt, dass die anfangs sich immer steiler einstellende Längsaxe von einer

bestimmten Stellung (d Fig. 5 Taf. VII) an sich wieder mehr horizontaler Richtung nähert. Diese der ursprünglich zunehmenden Neigung gegensinnige Drehung um eine, im Raum horizontale Schwerpunktsqueraxe des Körpers (ψ Fig. 6 Taf. VII) muss sich sofort geltend machen, wenn das Moment der abwärts drehenden Kräfte des Luftwiderstandes gegen die Rotation über das Moment der entgegengesetzt wirkenden Drehkräfte, welche das leichte Flügelende aufwärts zu drehen streben, überwiegt. Die abwärts drehenden Kräfte resp. Komponenten des Widerstandes gegen die Rotation entstehen hier, geradeso wie die horizontal drehenden Kräfte des Widerstandes gegen den Fall, während die um ihre Längsaxe sich drehende Platte gleichzeitig nach zwei Richtungen, der Länge wie der Quere nach geneigt ist. Beide entstehen mit dem Augenblicke der Überschreitung der quer senkrechten Lage der Platte und dauern bis zur Annahme quer horizontaler Stellung an. Die horizontalen Komponenten des Widerstandes gegen die Rotation verzögern die horizontale Drehgeschwindigkeit. Ich werde übrigens auf die abwärts drehende Wirkung des Rotationswiderstandes in gewissen Lagen horizontal drehender Platten jetzt nicht weiter eingehen, da ich ohnehin bei Gelegenheit des nächsten (XII.) Typus, bei dem der gleiche Vorgang stattfindet, denselben näher betrachten muss.

Mit diesem Verhalten in engem, freilich durch die gleichzeitige Drehung um zwei Axen im Einzelnen sehr verwickeltem Zusammenhang stehen auch die regelmässig beobachteten gleichen Fallzeiten während der ersten und zweiten Hälfte des Gesammtfallraumes von 6 m. Vor Beginn der charakteristischen Drehungserscheinungen steigt die Fallgeschwindigkeit anfangs an, nimmt dann in Folge der zunehmenden Neigung der Platte und damit zunehmend horizontaler Richtung der Bahn (bei b Fig. 5 Taf. VII) wieder ab. Während der Einleitung zur Rotation (von Stellung c nach d Fig. 5 Taf. VII) beginnt sie neuerdings zu wachsen, indess auch das schwerere Ende wieder mehr vorauseilt, bis schliesslich die wachsende horizontale Rotationsgeschwindigkeit unter erneuter andauernder Fallverlangsamung allmählich die endgültige gleichförmige Geschwindigkeit herbei-

führt. Dieselbe ist natürlich wiederum nicht absolut gleichförmig, sondern nähert sich asymptotisch einer gewissen Grösse ohne dieselbe je zu erreichen. Man kann sie aber von einem gewissen Moment an sehr wohl als gleichförmig betrachten.

Bei Gelegenheit der Analyse der Spiralbewegung bei den Flugorganen des IX. Typus wurde das Verhalten von länglichen Platten geschildert, deren Schwerpunkt um einen geringen, wenn auch merklichen Betrag gegen das eine Ende verschoben ist. Es bilden solche Formen Zwischentypen zwischen dem IX. und XI. Typus und deren Verhalten stellt einen ausgesprochenen Übergang zum letzteren dar. Denken wir uns mit zunehmender Verschiebung des Schwerpunktes den Radius der spiraligen Bahn desselben immer enger werden, so wird die letztere endlich geradlinig. Die wachsende Annäherung an die letztere wird bedingt von der Grösse der algebraischen Summe aller statischen Momente der drehenden Kräfte in Bezug auf die im Raume vertikale Schwerpunktsaxe und diese hängt wieder von dem Verhältniss der beiderseits des Schwerpunktes gelegenen Länge der angreifenden Hebelarme ab.

Bei aller Ähnlichkeit im Verhalten zwischen den beiden Bewegungsformen ist mit dem Hereinfallen der vertikalen Raumaxe der Drehbewegung in den Körper selbst ein höchst wesentlicher prinzipieller Unterschied gegeben.

Es ist nämlich ausser dem Entstehen senkrecht wirkenden Drehkräfte und der dadurch erzeugten zunehmend horizontalen Stellung der Längsaxe der bisher noch nicht besprochene Umstand von Wichtigkeit, dass bei den Organen des XI. Typus ein Stück des Körpers sich zur fortschreitenden Bewegungsrichtung umgekehrt dreht, wie das andere.

Betrachten wir die drehende Horizontalbewegung als eine fortschreitende Bewegung der Längsaxe des Organes, was für jeden Punkt ausser dem Schwerpunkt richtig ist, so bewegen sich die beiden jederseits des Schwerpunktes gelegenen Stücke in zu einander entgegengesetzter Richtung. Bezeichnen wir die fortschreitende Bewegung des längeren Flügelendes als vorwärts gerichtet, so ist diejenige des kürzeren Nussendes eine Rückwärtsbewegung. Wie

wir nun gesehen haben, dreht sich die vorausschreitende Längskante des Organes zu Beginn der Horizontalbewegung nach aufwärts und das längere Flügelende behält diese aufwärtsdrehende Bewegung seiner jeweilig vorausschreitenden Vorderkante bei, auch nachdem die beschleunigte Rotation um die im Raum vertikale Schwerpunktsaxe eingetreten ist. Die vorausschreitende Kante des Flügelendes ist aber die direkte Fortsetzung der nachfolgenden Kante des Nusstheiles und umgekehrt die nachfolgende Kante des Flügeltheiles, welche sich immer abwärts dreht, die direkte Fortsetzung der vorausschreitenden Kante des Nusstheiles. In Folge dessen dreht sich also die vorausschreitende Kante des Nusstheiles abwärts und seine nachfolgende Kante aufwärts.

Diese gegensinnige Drehung des Nusstheiles muss nun mechanisch in Bezug auf die Ausnützung des Luftwiderstandes eine mehr oder weniger umgekehrte Wirkung haben, wie wir sie beim IX. Typus im Einzelnen verfolgten, resp. sie muss die erhöhte Wirkung des Flügeltheiles vermindern und es muss sich dies in der geminderten Leistungsfähigkeit der Organe bei gleichem Gewicht, gleicher Gestalt und gleicher Flächengrösse ausdrücken.

Die geprüften Eschenfrüchte ergaben nun thatsächlich kleinere Leistungsgrössen als z. B. die Ailanthusfrüchte, nichts destoweniger genügte dieses Ergebniss zur Klarstellung der Sachlage nicht. Ich stellte daher einige Versuche mit Modellen an, denen ich ganz flache Gestalt gab, weil bei solcher die den Nutzeffekt schädigende Wirkung des Nusstheiles ein noch bedeutenderes Resultat geben musste. Die Nuss der Eschenfrüchte ist im vertikalen Querschnitt von linsenförmiger Gestalt, in Folge dessen kann die Wirkung ihrer konvex gekrümmten Fläche als Angriffsfläche nur relativ gering sein. Ausserdem ist sie relativ schmäler.

Es wurden fünf Modelle hergestellt von 50 mm Länge und 10 mm Breite aus rechtwinkligen Streifen von gutem Schreibpapier. Die Nuss wurde bei vieren derselben durch aufgeklebte Kartonstücke hergestellt und zwar wurden zwei resp. drei der Modelle von je gleichem oder wenigstens nahezu gleichem Gewicht verfertigt. Modell 1 und 2 hatten gleiches Gewicht, dagegen war der Schwerpunkt beim ersteren,

Modell-Nummer	Projektionsgrösse in qmm	Gewicht in qmm	Flächenverhältn. beiderseits des Schwerpunkts	Art der Drehung	Fallzeit in Sekunden auf 6 m Fallhöhe	Fallzeit in Sekunden auf 3 m Fallhöhe	Fallzeit in Sekunden auf die letzt. 3 m	V in mm	v in mm	Lg
1	500	98,9	$\frac{15}{35}$	hor., vert.	4,2	2,1	2,1	1428	1732	1,213
2	500	98,9	$\frac{25}{25}$	vert.	5,6	3,0	2,6	1153	1732	1,502
3	500	142	$\frac{12,12}{37,88}$	hor., vert.	3,2	1,6	1,6	1875	2075	1,106
4	500	142	$\frac{25}{25}$	vert.	4,4	2,4	2,0	1500	2075	1,383
5	500	141	$\frac{12}{38}$	hor., vert.	3,8	1,9	1,9	1579	2068	1,309

entsprechend dem XI. Typus verschoben und beim letzteren, um das Verhalten von entsprechenden Formen des IX. Typus vergleichen zu können, median. Modell 3, 4 und 5 stimmten im Gewicht wenigstens fast vollkommen überein, indem nur Nr. 5 um 1 mgm weniger wog als 3 und 4. Nr. 3 besass einen noch stärker verschobenen Schwerpunkt wie Nr. 1. Nr. 5 hatte fast genau die gleiche Schwerpunktslage, jedoch war die Nuss nicht durch aufgeklebte flache Kartonstückchen, sondern durch einen, im Querschnitt elliptischen Körper von 5 mm grösster Dicke ersetzt, welcher aus einem aufgerollten Papierstreif hergestellt war und der genau bis zum Schwerpunkt reichte. Dadurch bekam die ganze verkehrt drehende Fläche des Apparates eine stark konvexe Krümmung und konnte nur sehr geringen Einfluss auf die Art des Luftwiderstandes erlangen.

Die Resultate dieser Versuche, welche die höchsten erlangten Werthe wiedergeben, sind nun in nebenstehender Tabelle dargestellt. Zu derselben ist noch zu bemerken, dass V die beobachtete Fallgeschwindigkeit pro Sekunde aus den letzten 3 m Fallhöhe berechnet, v die theoretische Fallgeschwindigkeit für Gewicht und grösste Projektionsfläche bei $3 = 1$ und Lg die Leistungsgrösse $= \frac{v}{V}$ bedeutet.

Das Resultat dieser Tabelle zeigt zunächst das Verhältniss der Leistungsgrösse zwischen den Typen IX und XI. Typus IX (Modell 2 und 4) leistet im Verhältniss zum ersteren (Modell 1 und 3) einmal $\frac{1{,}502}{1{,}213}$ = das 1,24 fache und im zweiten Falle $\frac{1{,}383}{1{,}106}$ oder das 1,25 fache.

Sodann zeigt die Tabelle als Hauptresultat die Richtigkeit der gemachten Voraussetzung betreffs der Hauptgründe der geringeren Leistungsfähigkeit des XI. Typus. Die ganz flachen Modelle leisteten wirklich bedeutend weniger, als die geprüften Eschenfrüchte und als das nach dem Typus der Eschenfrüchte mit konvexer Nuss hergestellte Modell Nr. 5. Dass letzteres übrigens doch ein wenig hinter der geprüften Eschenfrucht zurückblieb, dürfte ohne Zweifel an der im

Verhältniss zum Flügel ziemlich viel schmäleren Nuss derselben liegen. Versuche hierüber wurden indess nicht weiter angestellt.

Mit der Zunahme der Verlegung des Schwerpunktes und des Gewichtes von Modell 1 zu Modell 3 macht sich gleichzeitig eine Abnahme der Leistungsfähigkeit von 1,213 bis zu 1,106 bemerklich, welche zweifellos hauptsächlich durch die etwas steilere Neigung der Längsaxe im letzteren Falle verursacht wird. Modell 5 stellt sich übrigens etwas weniger steil ein als Modell 4.

Verbreitert man die Modelle bei gleicher Projektionsfläche und gleicher Schwerpunktslage, so nimmt die Leistungsfähigkeit ab. Sie stellen ihre Längsaxe steiler ein und auch die Rotationsgeschwindigkeit mindert sich. Verhält sich die Länge zur Breite wie 3 : 1, so funktioniren sie nur mehr sehr mangelhaft. Die ganze Bewegung stellt ein rasches Fallen in sehr steil geneigter Stellung dar unter nicht mehr deutlich zu erkennendem Hin- und Herflattern ihres Flügeltheiles. Natürliche Organe von solcher Form sind mir übrigens nicht bekannt geworden.

Verschmälert man im Gegentheile die Modelle, so geht die Rotation in doppeltem Sinne mit noch etwas steigender Geschwindigkeit vor sich und die Leistungsfähigkeit scheint nach einigen orientirenden Versuchen vielleicht um einen kleinen Bruchtheil steigerbar. Bedeutend indess in keinem Falle. Genaue Versuche habe ich übrigens hierüber nicht weiter angestellt.

XII. Haupttypus.

Die länglich plattenförmigen Flugorgane mit einer schwach belasteten Längs- und einer stark belasteten Kurzkante.

(Taf. I, Fig. XII, 1—3; Taf. II, Fig. 12—20; vgl. Fig.-Erkl.)

Die Organe stellen typisch dünne ebene Platten von länglichem Umriss dar, deren Schwerpunkt sowohl in der Längsrichtung als in der Querrichtung bedeutend verschoben ist. Die stärkste Verschiebung findet in der Längsrichtung statt. Die verschiedengestaltete Nuss besitzt auf einer Seite einen länglichen, häutigen, steifen, unsymmetrischen und längs des einen Randes stark verdickten Flügel, welcher im übrigen sehr verschiedene Gestalt haben kann und entweder ganz eben oder in der Fläche ein wenig gekrümmt ist. Die Organe besitzen in Bezug auf keine ihrer 3 Körperaxen stabile Gleichgewichtslage. Die Fallbewegung findet unter sehr beschleunigter horizontaler Drehung um eine, nahezu mit der stabilen Vertikalaxe der Organe zusammenfallende, vertikale Raumaxe statt. Die sehr ungleiche Flächengrösse beiderseits der freien Axen bedingt Schieflage mit die Queraxe sehr spitzwinklig schneidender stärkster Neigungsrichtung. So entstehen bedeutende horizontale Drehkräfte. Die Horizontaldrehung erzeugt wiederum senkrechte Drehkräfte, welche in typischen Fällen sehr rasch die günstigste, nämlich fast horizontale Flächenlage herbeiführen. Durch gleichzeitige fortgesetzte Oszillationen um die Längsaxe wird ausserdem eine bedeutende Fallverlangsamung erzielt, indem sich die Organe zeitweilig durch die ihnen innewohnende lebendige Kraft der Drehung relativ in die Höhe schrauben. Die Bahn des Schwerpunktes ist ty-

pisch eine geradlinige, lothrechte. In Folge der Stabilität der Drehaxe entstehen indess durch geringe Störungen sehr leicht zur Drehrichtung gegenläufige stabile Axenneigungen und ebensolche Spiralbahnen. Bei Verschwinden der Störung erzeugenden Ursache verengern sich die Spiralen unter Vertikalstellung der Drehaxe und gehen allmählich wieder in geradlinige lothrechte Richtung über.

Beispiele. Die Zahl der einzurechnenden Flugorgane ist sehr bedeutend. Wahrscheinlich gibt es aber noch weit mehr, als mir bisher bekannt geworden sind. Einen wesentlichen Theil der hier gemachten Angaben, namentlich alles die Familie der Sapindaceen betreffende verdanke ich der Güte des Herrn Professor Radlkofer.

Früchte sowohl als Samen gehören hierher, besonders häufig sind es Theilfrüchte von mehrfruchtblättrigen Gesammtfrüchten. Ich nenne solche Theilfrüchte der Einfachheit halber ebenfalls Früchte.

Vor allem findet sich die Ausbildung bei sämmtlichen Arten der grossen Gattung Acer, ferner bei zahlreichen Gattungen der beiden tropischen Familien der Malpighiaceen und Sapindaceen.

Von den letzteren beispielsweise bei den Gattungen Serjania, Thinouia, Diatenopteryx, Thouinia, Toulicia, Thouinidium, Atalaya und Hornea, unter denen besonders die erste, vierte und siebente Gattung sich durch ihre Ausbildung auszeichnen. Die Sapindaceen-Flügelfrüchte unterscheiden sich von den sonst sehr ähnlichen Ahornfrüchten äusserlich dadurch, dass sich hier der morphologisch obere Rand der geflügelten Cocci verdickt, bei den Ahornfrüchten dagegen der morphologisch untere.

Bei den Malpighiaceen, wo die Flügelausbildung auch häufig vorkommt, z. B. höchst charakteristisch bei Banisteria, ist ebenfalls der morphologisch obere Rand der hier nur aus einem Carpell gebildeten einfachen Flügelfrucht verdickt.

Aber auch eine nicht unbeträchtliche Zahl von einzelnen Gattungen ganz verschiedener Familien erzeugt hierher ge-

hörige Organe von mehr oder minder ähnlichem Bau und gleicher mechanischer Funktion. So unter den Anacardiaceen die Gattungen Loxopterygium und Schinopsis. Die Früchte der letzteren Gattung weichen durch die Art ihres Flügelgewebes, welches eine relativ dicke schwammige Schicht darstellt, von den übrigen hierhergehörigen Formen ab, funktioniren aber eben so. Unter den Euphorbiaceen die Gattung Hymenocardia, unter den Phytolaccaceen Seguieria, unter den Sterculiaceen Tarrietia, unter den Leguminosen Nissolia, Machaerium, Tipuana, Platypodium, Centrolobium, Ferreirea (Papilionaceen), Pterolobium und Pterogyne (Caesalpiniac.), und unter den Polygaleen Securidaca.

Bei den ebenfalls hierher zu rechnenden Früchten von Carpinus betulus bildet die persistirende blattartige Cupula den Flügel.

Noch häufiger als Flügelfrüchte scheinen Flügelsamen ähnlicher Funktion vorzukommen. Sie treten hier sogar in ganz gesonderten Classen, wie den Gymnospermen und Angiospermen auf. Vor allen Dingen besitzen unsere sämmtlichen einheimischen Coniferen mit Ausnahme von Juniperus dieselben. Nur bei P. Cembra scheint das Flügelrudiment werthlos. Auch sehr vielen auswärtigen Arten kommen sie zu. Der Flügel soll hier kein Auswuchs der Samenhülle, sondern eine sich ablösende dünne Lamelle der Zapfenschuppe sein. Ferner finden sich hierherzurechnende Flügelsamen bei Gattungen und Arten der Casuarineen, Proteaceen, Büttneriaceen, Caesalpiniaceen (Schizolobium), Sterculiaceen, Cedrelaceen, Pittosporeen und Legnotideen, und vermutlich ist die Zahl der einschlägigen Formen eine noch weit bedeutendere. Die Flügel sind hier Auswüchse der Testa. Ein Analogon zu den obengenannten Anacardiaceenfrüchten bieten darunter die Samen der Cedrelacee Swietenia. Deren mächtiger Flügel besteht aus einem ziemlich dicken, leichten und lockeren Gewebe.

Trotz ausserordentlich verschiedener Grösse (von mehreren mm bei den Theilfrüchtchen mancher Sapindaceen

bis 10 und 15 cm bei den Samen der Papilionacee Schizolobium und den mächtigen Flügelhülsen der zur gleichen Familie gehörenden Gattung Centrolobium) gleichen sich die hierhergehörigen Organe im Umriss und Bau in hohem Grade und stellen einen sehr charakteristischen und ausgezeichneten Typus dar. Der einseitig entwickelte Flügel ist flach, länglich, meist häutig und längs des einen Randes verdickt und damit gleichzeitig versteift und belastet. Derselbe zeigt eine oft bis ins Einzelne gehende, auffallende Ähnlichkeit mit Insektenflügeln, namentlich den Vorderflügeln von Schmetterlingen, ist entweder ganz (z. B. bei vielen Ahornfrüchten) eben oder häufig schwach nach der Fläche gekrümmt und zwar wesentlich in der Längsrichtung (z. B. Picea excelsa), oder endlich in manchen Fällen mehrfach hin und hergebogen, sowohl der Länge als der Quere nach (Samen von Pinus sylvestris und Verwandten sowie von Abies pectinata.) Manchmal stellt er ein Stück einer sehr flachen Schraubenfläche dar. Ausserdem sind die Flügel sehr verschieden lang und breit und von Flügeln, deren Länge 4—5mal ihre Breite übertrifft (Pinus sylvestris, manche Ahornfrüchte) bis zu solchen, welche nahezu gleiche Länge wie Breite besitzen, (z. B. Abies pectinata) herrscht eine grosse Mannigfaltigkeit.

Da die Flügel der Luft Widerstand leisten müssen, so sind sie, um gleichzeitig den Anforderungen in Bezug auf geringes Gewicht und grösste Widerstandsfähigkeit Genüge leisten zu können, meist aus sehr dünnen Membranen aufgebaut und durch stärkere aus Gefässbündeln bestehende Rippen versteift. In solchem Falle, bei den grösseren Organen, verläuft eine starke Rippe längs des einen Randes immer schwächer werdend bis zum oberen Flügelende und von ihr aus gehen in mehr oder weniger schiefer Richtung zahlreiche oft sich wiederum verzweigende bogig gekrümmte Seitenrippen aus, welche immer feiner werdend, zum anderen Rande verlaufen. Die kleineren Organe, wie die Coniferensamen, besitzen nur einen verstärkten Vorderrand, welcher dem geringeren Luftwiderstande, welchen sie auszuhalten haben, genügt. Seiten oder Querrippen zur Verstärkung der Flügelfläche fehlen dagegen. Bei den Samen von Abies

pectinata wird die Versteifung wesentlich durch eine starke Längsfalte im Flügel gefördert.

Auch die Gestalt der eigentlichen Frucht oder des eigentlichen Samens selbst, also der Nuss, kann sehr verschieden sein. Sie schwankt zwischen mehr oder weniger kugeliger, bis ganz flach zusammengedrückter Form, und hat in vielen Fällen, von der Fläche aus gesehen, eine mehr oder weniger ovale, länglichovale bis ovaldreieckige Gestalt mit freier Spitze, wogegen das stumpfere Ende die Ansatzstelle des Flügels bildet. Oft ist die Frucht längs ihres freien Randes von einer mehr oder weniger scharfen Kante umzogen, welche die direkte Fortsetzung des Flügels darstellt. Bei den ursprünglich zu mehreren (2) verwachsenen Theilfrüchten des Ahorns bildet die frühere Verwachsungsstelle eine zur Längsrichtung des Organs schief gerichtete kleine Querfläche, gerade als ob mit scharfem Messer ein Stückchen abgetrennt worden wäre.

Was die Dimensionen des Flügels im Verhältniss zur Nuss anlangt, so können dieselben ebenfalls sehr schwanken und in der Fläche gesehen vom einfachen ihrer Grösse bis zum 9 und 10fachen ansteigen. Manchmal sind solche Schwankungen innerhalb der nämlichen Art und sogar an den Samen der nämlichen Frucht zu beobachten. So beispielsweise an den Samen mancher Coniferen, wo die einen Zapfenschuppen äusserst kurzflügelige, die andern dagegen grossflügelige Samen tragen. Dazwischen finden sich alle Uebergänge.

In der Gewichtsvertheilung zwischen Nuss und Flügel herrscht ebenfalls eine grosse Breite der Möglichkeit. Bei verschiedenen Fichtensamenproben mit wohl ausgebildeten grossen Flügeln erhielt ich, um ein bestimmtes Beispiel anzuführen, als mittleres Gewichtsverhältniss von Samen zu Flügel c. 5 : 1, wobei zu bemerken ist, dass der unterste, dem Samen anliegende Theil des Flügels zum Samen gerechnet wurde. In anderen Fällen bestehen bald bedeutend kleinere, bald bedeutend grössere Unterschiede.

Im Übrigen ist noch folgendes zu bemerken:

Das Nussende der Organe werde ich auch als das untere, das Flügelende als das obere bezeichnen. Seite

oder Fläche bedeutet dasselbe und die obere oder untere Seite ist die jeweilig bei der Funktion nach oben oder unten gekehrte. Der von der Nuss ausgehende dickere und schwerere versteifte Rand der Organe, sei es morphologisch der untere oder obere, heisst der Vorderrand oder die Vorderkante, weil er bei der Bewegung immer vorausgeht, der dünne und leichte, häutige, da er bei der Bewegung der nachfolgende ist, der Hinterrand oder die Hinterkante.

Der Schwerpunkt fällt bei den natürlichen Objekten in der Regel in die Linie der grössten Längsausdehnung. In dieselbe fällt meist gleichzeitig diejenige der drei Hauptträgheitsaxen, welche der Längsaxe z des Modelles resp. der schematischen Fig. XII Taf. I entspricht.

Die Richtungen der stärksten Ausdehnung der beiden anderen dazu senkrechten Dimensionen fallen dagegen nicht mit Schwerpunktsaxen zusammen, sondern können verschieden weit vom Schwerpunkte verlaufen. Die grösste Breite besitzt meist die Mitte des Flügels, die grösste Dicke die Mitte der Nuss. Der Schwerpunkt liegt also in der Längsaxe der Organe und zwar je nach der Länge der Flügel verschieden weit von dem Schwerpunkt der Nuss entfernt. Bei den Früchten von Acer platanoides, welche ganz besonders zu den einschlägigen Versuchen benützt wurden, fällt er, wie auch sonst häufig, noch in den Körper der Nuss hinein und zwar etwa zwischen das zweite und obere Drittel. Bei Acer pseudoplatanus fällt er meist etwas näher an die Ansatzstelle des Flügels. Doch sind hier ziemlich starke Schwankungen möglich. Bei ganz kurzflügeligen Organen rückt er bis ziemlich nahe an den Schwerpunkt der Nuss hin.

Was das Verhältniss der Trägheitsmomente in Bezug auf die Hauptträgheitsaxen der Organe, sowie die Lage der letzteren angeht, so muss man sich mit Berechnungsresultaten, welche an grösseren vereinfachten Modellen gewonnen wurden, resp. mit Schätzungen begnügen.

Ich habe solche Berechnungen für grössere Modelle ausgeführt und zwar besonders genau für ein Modell aus Papier, Karton und Holz, welches sehr sorgfältig gearbeitet war und so gut wie die natürlichen Objekte funktionirte.

Nachdem ich festgestellt hatte, dass die Gestalt der Nuss sowie auch bis zu einem hohen Grade diejenige des Flügels für den mechanischen Vorgang des Drehens unwesentlich ist, gab ich der Erleichterung der Berechnung halber der Nuss die Form einer Kugel, welche in zwei Hälften an einem Ende eines länglich rechteckigen Flügels befestigt war. Letzterer bestand aus starkem Schreibpapier und die Versteifung resp. Belastung aus zwei schmalen Kartonstreifen war am Vorderrand so angebracht, dass die durch den Schwerpunkt gehende Längsaxe, in Bezug auf welche der Apparat das geringste Trägheitsmoment besass, den Längskanten parallel lief. Die beiden Halbkugeln der Nuss wurden zugleich in der Weise aufgeklebt, dass der Schwerpunkt der Nuss genau in die Richtung der genannten Axe fiel. Fig. 1, a u. b Taf. VIII stellt den ganzen Apparat in reduzirtem Verhältniss dar. Nachdem das Gewicht der zur Verfertigung des Apparates verwendeten Stoffe vorher einzeln festgestellt worden war, bot die Berechnung des gesammten Modells, dessen Massverhältnisse genau bekannt waren, keine besonderen Schwierigkeiten.

Nennen wir die zur Flügelfläche der Organe vertikale Schwerpunktsaxe die y-Axe, die dem belasteten Vorderrand genäherte Längsaxe die z-Axe und die zu diesen beiden senkrechte (quer in der Fläche des Organs verlaufende) Axe die x-Axe (entspr. Fig. I Taf. VIII), so ergab sich, wenn T_y, T_x und T_z die zugehörigen Trägheitsmomente bedeuten, folgendes Resultat*) nach Millimetern und Milligrammen:

$$T_y = 3104422 \text{ mgr} \cdot \text{mm}^2, \quad T_x = 2759398 \text{ mgr} \cdot \text{mm}^2,$$
$$T_z = 461700 \text{ mgr} \cdot \text{mm}^2.$$

Wenn wir die Gewichtsgrössen durch Division mit $g = 9810$ (= mm) auf die Massengrössen bringen, so erhalten wir

$$T_y : T_x : T_z = 316 : 281 : 47.$$

Ziehen wir hieraus die Quadratwurzel und multipliziren

*) Genaueres hierüber s. in den Zusätzen zum XII. Typus N. 1. Ebendaselbst s. auch einige Angaben über das p. 251 erwähnte, gewissen Ahornfrüchten ähnliche Modell.

die reziproken Werthe der so erlangten Grössen mit einer beliebigen Konstanten, z. B. mit F, so erhalten wir

$$\frac{F}{\sqrt{316}} = \frac{F}{17{,}79}; \quad \frac{F}{\sqrt{281}} = \frac{F}{16{,}7} \text{ und } \frac{F}{\sqrt{47}} = \frac{F}{6{,}8}.$$

Setzen wir schliesslich, um zu möglichst einfachen Zahlen zu gelangen, F = 17,79, so erhalten wir die drei Grössen 1, 1,065 und 2,59.

Wenn man diese Zahlen nun als eben so viele Masseinheiten von dem Schwerpunkte als Ursprung eines rechtwinkeligen Ordinatensystems aus auf den entsprechenden Axen abträgt, so bilden die betreffenden Stücke die Haupthalbmesser des im allgemeinen Theil bereits besprochenen Centralellipsoides. In dem berechneten Falle verhalten sich die ganzen Hauptdurchmesser des Centralellipsoides also = y : x : z = 2 : 2,13 : 5,18 und es wäre sonach im luftfreien Raume die z Axe, da sie am stärksten von der mittleren Axe abweicht, die stabilste Axe des Modells. Dieselbe entspricht der Längsaxe und ist gleichzeitig die Axe des kleinsten Trägheitsmomentes.

Die y Axe, oder die kürzeste Axe des Ellipsoides, welche der zur Fläche des Modelles vertikalen Axe entspricht, besitzt das grösste Trägheitsmoment und ist als ebenfalls von der Mittelaxe abweichend auch stabil, jedoch nicht in gleichem Masse wie die z Axe. Die mittlere Axe (x) ist nicht stabil. Sie entspricht der Queraxe des Modells.

Die Resultate dieser Berechnung lassen sich wenigstens approximativ auf natürliche Organe, speziell auf manche besonders regelmässig gestaltete Exemplare von Acer pseudoplatanus übertragen.

Diesen sehr ähnlich gestaltete Modelle, deren Flügel eine halbe Kreisscheibe darstellt, und welche ebenfalls ganz typisch funktioniren, geben nämlich den angeführten so ähnliche Resultate, dass ich dieselben besonders anzuführen unterlasse. (Fig. 1 c Taf. VIII stellt ein solches Modell dar.)

Was bei den natürlichen Organen die Vertheilung der Flächen beiderseits der Hauptträgheitsaxen anlangt, welche hier überaus wichtig ist, so verhält sie sich für die beiden

Flächenaxen, die Längs- und die Queraxe, welche dabei allein in Betracht kommen, meist in der Weise, dass in Bezug auf erstere Axe das Verhältniss zwischen $^4/_5$ bis $^1/_4$, in Bezug auf die letztere Axe zwischen $^1/_3$ bis $^1/_7$ schwankte, wobei die Unterschiede in der Flächenvertheilung nach einer Richtung mit denen in der anderen Richtung in einem gewissen Verhältniss stehen.

Früchte des Spitzahorn (Acer platanoides).

Gut ausgebildete, in grösserer Zahl im Spätherbst 1887 von mir selbst gesammelte Exemplare haben in der Mehrzahl eine grösste Länge von etwa 50 mm und ausser dem oberen verschmälerten Ende des Flügels eine ziemlich gleiche Breite von 8—9 mm. Im Umriss sind dieselben messerförmig geschweift mit etwas konkavem Vorder- und konvexem Hinterrande. Die Nuss selbst nimmt etwas über den vierten Theil der Fläche des ganzen Organes ein und ist sehr flach zusammengedrückt. Die Flügelfläche ist meist fast ganz eben, nur zufällige kleine Verbiegungen der Ränder des obersten Endes zeigend. Der durch eine starke Rippe versteifte Längsrand ist ganz flach, der dünne Hinterrand etwas wellig hin und hergebogen und meist ein ganz klein wenig nach einer Seite ausgebaucht.

Ein Versuchsorgan, welches genau dieser Beschreibung entsprach (Fig. 12 Taf. II), hatte 0,231 grm Gewicht. Sein Flächeninhalt betrug 613 qmm, wovon 169 auf die Nuss und 444 auf den Flügel kamen. Der Schwerpunkt befand sich bei $^{11}/_{51}$ der grössten Länge, welche 51 mm betrug. Die Fläche war beiderseits der Längs- und Queraxe so vertheilt, dass die von der ersteren gebildeten Abschnitte sich wie $^{234}/_{379}$ und die von der zweiten wie $^{115}/_{498}$ verhielten, wobei der kleinere Abschnitt je dem schwereren Vordertheil und dem schwereren Nusstheil zukamen.

Liess ich dieses Organ mit der Nuss genau senkrecht nach abwärts gerichtet, also in senkrechter Stellung seiner Längsaxe fallen, so fiel es 2 m senkrecht herab ohne merklich seine Stellung zu verändern. Schliesslich begann es sich schief zu stellen und zu drehen, so dass es meist bei

einer Fallhöhe von 2,50 m in fast horizontaler Flächenstellung in horizontaler Rotation um eine durch seinen Schwerpunkt gehende, im Raume senkrechte Axe begriffen war. Von dem Moment des Drehungsbeginnes an verlangsamte sich gleichzeitig seine vorher bedeutend beschleunigte Fallgeschwindigkeit.

Sehr rasch kam es zum Drehen bei umgekehrt senkrechter oder wagrechter Stellung, sowie beliebigen schiefen Stellungen, wenn das Nussende nicht abwärts gerichtet war.

Aus natürlicher Fallstellung, wie die Frucht am Baume hängt, also mit unter einem Winkel von etwa 28° geneigter Längsaxe und vertikal gestellter Fläche, wobei das Flügelende nach abwärts geneigt ist, ergaben sich folgende Fallzeiten:

6 m Fallhöhe wurden in 5,4 Sek. durchfallen und zwar der
1. m in 0,8 Sek.
2. „ „ 1,1 „
3. „ „ 0,7 „
4.—6. „ „ 2,8 „ also je 1 m in 0,93 Sek.

Für die letzten 3 m ergibt sich somit eine Fallgeschwindigkeit von $\frac{1}{0{,}93}$ m = 1,071 m pro Sekunde. Die Vertheilung der Fallzeiten auf die Fallräume ist hier sehr auffallend. Die grösste Fallverlangsamung tritt im zweiten Meter der Fallhöhe ein, im dritten Meter tritt eine grössere Beschleunigung ein, welche derjenigen während des ersten Meters entspricht, und dann scheint neuerdings eine Verlangsamung einzutreten.

Die mittlere Geschwindigkeit für grössere Fallräume, wie z. B. für je 3 m bleibt dagegen ganz gleich und es ist nach sehr sorgfältigen Fallversuchen, welche namentlich mit den Früchten des Traubenahorns gemacht wurden, der Wechsel zwischen grösserer und kleinerer Geschwindigkeit ein innerhalb kurzer Fallräume sich beständig wiederholender. Ich werde auf dieses Verhalten, welches uns zunächst nicht weiter berührt, später zurückkommen.

Zur Berechnung der theoretischen Fallgeschwindigkeit wären nach den einleitenden Auseinandersetzungen ausser der grössten Projektionsfläche und dem Gewicht der Organe

einmal der Koeffizient 3 für die Gestalt der Widerstandsfläche und ausserdem der Kosinus des Winkels, welchen während der Rotation die Fläche mit der horizontalen macht, in die Widerstandsgleichung einzuführen. Nachdem wir indessen nur den Winkel der Längsaxe zum Horizont annähernd erkennen (derselbe betrug c. 7^0), wogegen die Neigung der Queraxe wechselt, wie wir später sehen werden, so bleibt nichts übrig, als die beiden letztern Grössen ganz ausser Berechnung zu lassen und uns rein auf die theoretische Formel aus Fläche und Gewicht zu beschränken. Wir erhalten dann

$$v = \sqrt{\frac{19620 \cdot 231}{0{,}001293 \cdot 613}}$$

$$v = 2391 \text{ mm.}$$

Nachdem die beobachtete mittlere Geschwindigkeit 1071 mm beträgt, ist die Leistungsgrösse $\frac{2391}{1071} = 2{,}232$ und schliesst sich damit nahe an die höchsten Leistungsgrössen der oszillirenden Formen des X. Typus an. Auf die Gründe dieser hohen Leistungsgrösse werde ich später zurückkommen.

Die Frucht des Spitzahorns erwies sich als besonders geeignet, den Verlauf der Bewegung im Einzelnen zu verfolgen, namentlich dann, wenn man eine der letztgenannten Stellungen zum Ausgangspunkt nimmt, in denen die Drehung sehr rasch eintritt.

Ich wählte dazu die natürliche Lage, in welcher die Theilfrüchte an ihrem Fruchtstiele am Baume hängen und in der die lange schmale Trennungsfläche, durch welche die Theilfrüchte sich nach der Reife von einander lösen, senkrecht steht. Die Längsaxe des Organes machte dabei einen Winkel von 28^0 mit dem Horizont und die Fläche stand senkrecht.

Die Bewegung während des Falles wurde nun in der Weise verfolgt, dass die Frucht aus verschiedenen Höhen bis 100 cm mit Intervallen von 2—5 cm auf eine Unterlage von feinem Sand fallen gelassen wurde. Sie springt dann beim Auffallen nicht, sondern bleibt ruhig in der Stellung, in welcher sie auffällt, liegen. Bei den ganz steilen Anfangsstellungen dringt die schwere vorausgehende Nuss

häufig sogar in den Sand ein und das Organ bleibt in einer der momentanen Auffallstellung sehr ähnlichen Stellung schief aufrecht im Sande stecken. Eine längere, im Einzelnen vielfach wiederholte Reihe solcher Fallversuche gibt schliesslich die bestimmte Deutung jeder einzelnen Lage nach dem Auffallen auf dem Sande, und bis über Dreiviertel der angegebenen Fallhöhe kann man mit grosser Sicherheit den Fall auf sólche Weise, ohne die Bewegung im Einzelnen direkt sehen zu können, beobachten. Darüber hinaus wird dagegen die Deutung unsicher. Ganz genau die Lage in jedem Augenblicke festzustellen, ist überhaupt nicht möglich, höchstens mittelst photographischer Momentaufnahme liesse sich solche Genauigkeit erzielen.

Die eine Seite der Frucht wurde bezeichnet, um sofort die Richtung, nach welcher die Drehung statt hatte zu erkennen. Es wurde dabei festgestellt, dass bei ganz genau vertikaler Flächenstellung immer die quer schwach konkave Fläche sich nach aufwärts drehte, indessen war nicht möglich, diese vertikale Stellung immer genau beizubehalten und in Folge dessen drehte sich manchmal auch die konvexe Fläche nach oben. Dies geschah, wenn zufällig die Queraxe in der Fallstellung eine nach der konvexen Seite gerichtete kleine Neigung besass. Die Bewegung fand übrigens, ob die Drehung nach der einen oder der anderen Weise vor sich ging, ganz gleich, nur in umgekehrter Richtung statt, und die mit abwechselnd stattfindender Drehung vor sich gehenden Bewegungen dienten sogar zu gegenseitiger Kontrole.

Die Lage des Organes nach dem Auffallen aus den verschiedenen Fallhöhen wurde mit den im Sande erzeugten Spuren genau gezeichnet und jede Zeichnung mehrfach genau kontrolirt, um zu sehen, was von der Spur zufällig und was ausnahmslos erzeugt wird.

Ich kann hier nun nicht jede einzelne Lage für kleine Zwischenräume wiedergeben, indess will ich wenigstens einige der beobachteten Lagen schildern. Die Figuren 2 u. 3 Taf. VIII, auf welche ich dabei verweise, demonstriren die fortwährende Änderung und zeigen, dass sich die Bahn annähernd so verfolgen lässt.

Von 0—14 cm Fallhöhe: Das Organ fiel mit seiner Hinterkante voraus und erzeugte mittelst dieser und des Nussendes Eindrücke. Je höher der Fallraum, desto schärfer wurden die Eindrücke des letzteren und desto weiter entfernen sich die Eindrücke des Hinterrandes von der Horizontalprojektion der anfänglichen Stellung nach rechts oder links. Bei 12 cm Fallhöhe war der Eindruck noch scharf und die Längsaxe des aufgefallenen Organs machte mit der Anfangsprojektion einen Winkel von 27^0—29^0. Über 12 cm war der Eindruck verwischt und das Organ machte einen noch grösseren Winkel. Bei 14 cm fiel es mit der Flügelfläche ganz flach auf und nur das Nussende machte einen scharfen Eindruck. Das Organ blieb nahe an der Auffallstelle liegen. Soviel sich beobachten liess, hatte es im Moment des Auffallens eine Neigung von 45^0 zur horizontalen. Auf dem Boden liegend hatte seine Längsaxe einen Winkel von c. 45^0 beschrieben. Das Organ hatte also während dieser Fallstrecke folgende Lageveränderungen ausgeführt: Aus quersenkrechter und längsgeneigter Lage (mit höherem Nussende und abwärts gerichtetem Hinterrand) war es durch quer (schwach) geneigte und längs horizontale in querhorizontale und längs geneigte Lage (mit abwärts geneigtem Nussende) übergegangen und hatte dabei in der Horizontalprojektion einen Winkel von 45^0 um seinen Schwerpunkt beschrieben in der Richtung, nach welcher sich der vorausgehende Hinterrand drehte. Die Winkelgeschwindigkeit dieser Drehung wuchs dabei für gleiche Fallräume mit zunehmender Querneigung.

Von 14—25 cm Fallhöhe. Bei steigender Fallhöhe rückte die Richtung des Organes nach dem Auffallen wieder näher an die seiner ursprünglichen Horizontalprojektion heran und ging sogar sehr rasch darüber hinaus. Die Drehung ging also nunmehr in umgekehrtem Sinn vor sich. Der Moment, in welchem die ursprüngliche Richtung wieder erreicht wurde, liess sich jedoch nicht direkt beobachten. Die Bewegung ging in sehr steiler Längsneigung des Organes sehr rasch vor sich und beim Auftreffen auf dem Boden fiel es mit seiner Längsaxe unter einem meist sehr spitzen Winkel entweder vorwärts oder rückwärts darüber hinaus.

Während dieser Fallstrecke erzeugte der Hinterrand keinen Eindruck mehr im Sande, ebenso wenig der Vorderrand. Nur das Nussende that dies. Der Eindruck bestand in einer tiefen Rinne mit steilen Rändern, welche an einem Ende einen tiefsten Punkt besass. Hier fiel das Organ auf und zwar mit dem scharfen vorderen Eck der Nuss. Im Auffallen bewegte es sich mit seinem Flügelende zuerst etwas aufwärts und dann schief nach vorwärts, wodurch die verlängerte Rinne entstand. Es fiel schliesslich schief vorwärts nach der einen Seite und zwar immer so, dass die Vorderkante mit der Richtung der Rinne einen sehr spitzen Winkel machte, oder fast ganz mit ihr zusammenfiel. Bei c. 17 cm Fallhöhe fiel sie ganz mit ihr zusammen, bei 19 cm machte sie einen sehr kleinen spitzen Winkel, bei 25 cm einen um weniges grösseren.

Aus der Gestalt des Eindruckes im Sand sah man mit Bestimmtheit, dass während dieser ganzen Strecke die Frucht sehr steil mit dem spitzen vordern Eck der Nuss voraus fallen musste, ebenso, dass der Vorderrand des Organs nunmehr überhaupt vorausging, nicht wie früher nachfolgte. Ausserdem konnte man mit dem Auge im Moment des Auftreffens des Nussendes auf dem Boden sehen, dass, bevor das Flügelende sich schief nach vor- und abwärts bewegte, es zuerst noch eine kurze rasche Aufwärtsbewegung machte, als wolle sich das Organ senkrecht stellen. Diese Bewegung dauerte aber nur einen Augenblick und dann fiel es wieder zurück und zwar schief nach vorwärts. Es machte dabei mit wachsender Fallhöhe einen grösseren Winkel mit dem rinnenförmigen Eindruck, weil die Steilheit der Stellung beim Auftreffen zunahm, und zwar nicht nur der Längsaxe, sondern der ganzen Fläche. Es fand nämlich gleichzeitig eine Drehung des Organs um seine Längsaxe statt und zwar drehte sich der schwere Vorderrand abwärts und der Hinterrand aufwärts.

Also von der Lage, in welcher das Organ sich beim 14. cm Fallhöhe befand, und in welcher die Längsaxe etwa einen Winkel von 45° zur Horizontalen machte, wobei die Queraxe horizontal gerichtet war, stellte sich nunmehr die Längsaxe immer steiler, gleichzeitig ging die Queraxe

aus horizontaler zu wachsend geneigter Lage über. Die steilste Stellung der Längsaxe wurde zwischen 24 und 25 cm Fallhöhe erreicht, und betrug, soweit sie zu schätzen war, gegen 65°. Noch bei $22^1/_2$ cm war das momentane Sichaufrichten vor dem Niederfallen zu beobachten, dann aber nicht mehr. Bei 25 cm Fallhöhe war der Höhepunkt wahrscheinlich bereits etwas überschritten.

Während der Fallhöhen vom 14. bis zum 25. cm beschrieb die Längsaxe des Organs einen Winkel von 225° (180° zur Horizontalprojektion der anfänglichen Lage) und zwar ging diese Winkelbewegung, wie schon bemerkt, in umgekehrter Richtung wie die anfängliche vor sich und die schwere Vorderkante schritt dabei in immer steilerer Abwärtsneigung voran.

Von 25 cm Fallhöhe an ging die Winkelbewegung der Längsaxe in der Horizontalprojektion in gleichem Sinne und in beschleunigter Geschwindigkeit weiter, dagegen fing das Organ an, sich sowohl der Quere wie der Länge nach wieder mehr horizontal zu stellen, und zwar setzte sich diese, der früheren in doppeltem Sinne entgegengesetzte Bewegung dauernd fort bis eine nahezu horizontale Stellung erreicht war, in welcher das Organ dann, so lange der Fall anhielt, verharrte.

Auf hellem Hintergrunde eines Fensters oder einer hellfarbigen Wand kann man bei einer Fallhöhe von 90 cm und mehr die fast horizontale Stellung sehr wohl erkennen und die Richtung der Längsaxe zum Horizont durch wiederholten Vergleich mit entsprechend hergestellten Zeichnungen annähernd schätzen. Beim vorliegenden Versuchsorgan betrug dieselbe bei der angegebenen sowie bedeutenderen Fallhöhen ca. 7° entsprechend der schematischen Figur 7 Taf. VIII.

Von der, etwa 65° betragenden Neigung bei 25 cm bis zu dieser fast horizontalen Flächenlage ändert sich also in dem angegebenen Fallraum die Richtung der Längsaxe und die Stellung des Organes überhaupt ganz bedeutend und man kann diese Aenderung im Anfang der Fallstrecke, wo die Geschwindigkeit zu gross ist um direkt zu beobachten, wiederum nur an der Spur auf dem Sand einigermassen deutlich verfolgen.

Der Eindruck, welchen die Kante der Nuss, namentlich das vordere scharfe Eck derselben machte, wurde mit wachsender Fallhöhe immer weniger scharf und tief, der Wall, welchen die mit der Vorwärtsbewegung sich gleichzeitig aufwärts drehende Vorderkante der Nuss ausschaufelte, wurde immer kleiner. Ausserdem trat nunmehr eine neue Spur im Sande hinzu. Die ein wenig nach einer Seite gebogene mittlere Partie der Hinterkante begann (wenn diese Seite sich beim Fall nach abwärts gewendet hatte), einen Eindruck zu machen, welcher anfangs, bei 30 cm Fallhöhe, sich dicht an der betreffenden Stelle des liegengebliebenen Organes befand, bei wachsender Fallhöhe aber aus einem kleinen kurzen Grübchen zu einer etwas verlängerten bogenförmig gekrümmten flachen Rinne wurde, deren Anfang sich ausserdem immer weiter von dem hinteren Rande des Organs entfernte. Auch die Vorderkante des Flügels in ihrem oberen Theil traf auf den Boden auf und hinterliess eine Spur. Diese letztere war bei 30 cm Fallhöhe noch nicht, bei 35 cm kaum zu erkennen. Von 40 cm an dagegen wurde dieselbe deutlich und ihre Schärfe stieg mit der Fallhöhe. Bei 40 cm sah es aus, als ob das Organ mit seiner ganzen Flügelfläche gleichzeitig aufgefallen wäre. Bei grösserer Fallhöhe sah man deutlich, dass der Vorderrand zuerst auf den Sand traf und die Tendenz zur Aufwärtsdrehung desselben immer schwächer werden musste. Um den Eindruck des Vorderrandes zu Messungen zu benützen, war derselbe anfangs nicht oder wenig geeignet, erst bei grösseren Fallhöhen liess er genauere Messung zu und gab richtigere (etwas grössere) Zahlen, als der Eindruck des Hinterrandes.

Dieser letztgenannte war für die Beurtheilung der Neigung der Längsaxe, unter welcher das Organ auftraf, und ausserdem der Grösse der horizontalen Winkelbewegung in einem bestimmten Abschnitt des Fallraumes am wesentlichsten. Er zeigte, um welchen Winkel sich das Organ nach dem Auffallen auf dem Sande drehte. Dieser Winkel betrug bei 30 cm Fallhöhe etwa $2-3^0$, bei 40 cm $12-15^0$, bei 50 cm $22-25^0$ und bei 60 cm $70-75^0$. Er war mit einer Korrektur, welche sich aus der Grösse der Verschiebung des Nussendes während der Drehung am Boden ergab (diese war ebenfalls

annähernd richtig festzustellen), und welche ihn etwas verkleinerte, direkt messbar. Bei 70 cm Fallhöhe stieg der Winkel auf 126^0—137^0 und bei 80 cm auf 168^0—170^0 (diese nach dem Eindruck des Vorderrandes gemessen).

Nicht direkt messbar sondern nur indirekt beiläufig festzustellen ist die wirkliche Winkelbewegung, welche von dem Moment der ersten Berührung des Bodens mittelst des Nussendes bis zum Liegenbleiben des Organs vor sich geht. Ich versuchte sie möglichst genau zu bestimmen und erhielt für die erstgenannten entsprechenden vier Fallräume folgende Werthe: 20^0, 30^0, 108^0, 142^0. Bei noch höheren Fallräumen waren keine sicheren Anhaltspunkte mehr gegeben.

Was die Zahl der Umgänge für verschiedene Fallhöhen anlangt, so betrug dieselbe nach der Lage des Organs auf dem Sande für

40 cm 1 Umgang
55 „ 2 Umgänge
66 „ 3 „
75 „ 4 „
82 „ 5 „

Die Zahl der Umgänge war damit natürlich etwas zu gross, da ja das Organ noch auf der Unterlage sich drehte und zwar bei grösserer Fallhöhe mit steigender Geschwindigkeit. Berücksichtigte ich dies und zog nach den Spuren den jeweiligen Winkel ab, wobei natürlich Fehler unvermeidlich waren (die ganze Drehung auf dem Sande ist ja nicht sichtbar), so erhielt ich annnähernd die wirkliche Richtung der Horizontalprojektion des Organs für die betreffende Fallhöhe und konnte daraus bei Kenntniss der Neigungswinkel die ganze Bahn rekonstruiren.

Die Winkelbewegung der Horizontalprojektion ergab darnach für

40 cm 1 Umgang
57 „ 2 Umgänge
69 „ 3 „
78 „ 4 „
85 „ 5 „

Was den Neigungswinkel des fallenden Organs anlangt,

welchen man, wie gesagt, bei der Verlangsammung des Falles direkt beobachten konnte, so wurden beobachtet für

40 cm Fallhöhe ca. 30^0
60 „ „ „ 17^0
80 „ „ „ 10^0
88 „ „ „ 7^0

Die letzere Neigung erhielt sich dann dauernd, oder man konnte wenigstens bei noch höherem Fall keine bedeutenderen Aenderungen mehr beobachten.

Diese Winkel wurden mit den Neigungswinkeln, welche sich aus den Spuren im Sande erschliessen liessen, verglichen. Der Vergleich führte zu übereinstimmendem Resultate.

Am unsichersten blieb bei dieser Verfolgung der Bewegung die jeweilige Stellung der Queraxe des Organs indessen liess sich wenigstens eine annähernde Grenze der möglichen Neigung für jede einzelne Fallhöhe und den jeweiligen Eindruck feststellen. Die Rekonstruktion der Bahn selbst schliesslich geschah in der Weise, dass an einem zylindrischen Stab in den Beobachtungen entsprechenden Fallhöhen je eine Ahornfrucht mittelst Siegellack in ihrer jeweiligen Stellung befestigt wurde, so das auch in Horizontalprojektion die Winkelgrössen den beobachteten Winkeln entsprachen. Abgesehen davon, dass diese Darstellung die Axe der Bahn, natürlich nicht richtig wiedergibt, bietet sie im übrigen jedoch ein sehr instruktives Bild des ganzen Vorganges.

Der Schwerpunkt ist kurz nach Beginn der Rotation am weitesten von der Axe seiner Bahn entfernt, d. h. der Schwerpunkt umkreist die Axe während dieser Zeit mit dem grössten Abstande in einer schraubenförmigen Bahn. Mit der horizontaleren Stellung und rascheren Rotation rückt er ihr immer näher nnd fällt schliesslich bei gänzlich ungestörter Bewegung mit ihr zusammen oder wenigstens so gut wie zusammen. Im Beginne der Bahn erfolgt die jeweilige seitliche Verschiebung desselben und damit des ganzen Organs immer in der Richtnng der stärksten Flächenneigung des letzteren.

Der Verlauf der ganzen Bewegung charakterisirte sich also, wenn wir von den anfänglichen geringen Abweichungen

von der lothrechten absehen, im wesentlichen durch folgende auseinander hervorgehende Stellungen:

1. Ausgangsstellung: Längsaxe unter einem Winkel von 28^0 geneigt. Nussende oben, Flügelende unten. Fläche des Organs vertikal gestellt, belastete Vorderkante nach oben, leichte Hinterkante nach unten gerichtet.
2. Stellung bei 14 cm Fallhöhe: Längsaxe unter einem Winkel von 45^0 geneigt. Nussende unten, Flügelende oben. Fläche des Organs in der Querrichtung horizontal gestellt, Vorderkante nach rechts, Hinterkante nach links gerichtet oder umgekehrt. Das Organ hat sich gegenüber der Anfangsstellung in horizontaler Richtung und zwar nach der Seite, auf welcher die Hinterkante sich befindet, um 45^0 um seine im Raume vertikale Schwerpunktsaxe gedreht.
3. Stellung bei 25 cm Fallhöhe: Längsaxe unter einem Winkel von 65^0 zur Horizontalen geneigt. Nussende unten, Flügelende oben. Fläche des Organs unter einem Winkel von $73-80^0$ zur Horizontalen geneigt. Vorderkante schief nach vorn und unten, Hinterkante schief nach hinten und oben gerichtet, dem entsprechend die Queraxe in der gleichen Richtung unter einem Winkel von $18-23^0$ zur Horizontalen geneigt. Im Verhältniss zur 2. Stellung hat sich das Organ in horizontaler Richtung um einen Winkel von 225^0 um seine im Raume vertikale Schwerpunktsaxe gedreht. Die Drehung hat aber in entgegengesetztem Sinne, nach der Seite, auf welcher sich die Vorderkante befindet, stattgefunden.
4. Stellung bei 88 cm Fallhöhe: Längsaxe unter einem Winkel von 7^0 zur Horizontalen geneigt, Nussende tiefer, Flügelende höher stehend. Queraxe unter einem nicht sicher feststellbaren, aber jedenfalls sehr kleinen Winkel von vielleicht $2-3^0$ zur Horizontalen geneigt, mit tieferer Vorder- und höherer Hinterkante. Fläche des Organs also nahezu horizontal stehend. Die Drehung ist gleichsinnig derjenigen von der 3. zur 4. Stellung. Es ist dies die endgültige stabile Rotationsstellung, in welcher sich, abgesehen von gewissen

kleineren Schwankungen, auf welche ich noch besonders zu sprechen komme, das Organ dauernd erhält und horizontal gleichsinnig weiter dreht.

Die Uebergänge zwischen diesen vier Hauptstellungen, welche je einen deutlichen Abschnitt in der Bewegung bezeichnen, vollziehen sich, abgesehen von den schon besprochenen Drehungen um die im Raume senkrechte Schwerpunktsaxe durch Drehungen, welche man eingehender als ich dies gethan habe, in komponente Drehungen um die einzelnen Axen zerlegen kann. Es wäre dies zur ganz genauen Verfolgung der Bewegung in jedem Augenblicke von Werth, indessen glaube ich, dass das bisherige zur Klarstellung des Vorganges im wesentlichen genügen wird, so dass ich, um nicht zu weitläufig zu werden, nur noch weniges dem gesagten beizufügen brauche.

Von der Ausgangsstellung bis zur 3. Stellung bei 25 cm Fallhöhe sehen wir, abgesehen von den anfänglichen kleinen Verschiebungen der ganzen Organe, welche in horizontaler Richtung vor sich gehen, ein einfaches senkrechtes Abwärtsfallen mit allmähligem Vorauseilen der schwereren Theile und Zurückbleiben der leichteren, ganz entsprechend den gewöhnlichen Erscheinungen beim Fall in der Luft. Von der dritten Stellung an abwärts macht sich nun aber plötzlich der entgegengesetzte Vorgang geltend. Die schweren Theile steigen relativ zu den leichteren wiederum in die Höhe, so dass neuerdings fast horizontale Lage der Fläche hergestellt wird. Es geschieht dies unter beschleunigter Drehung um die im Raume senkrechte Schwerpunktsaxe und zwar unter Vorausgehen des schweren Vorderrandes bei der Drehung. Die Abnahme des Neigungswinkels zur Horizontalen hält dabei mit der Vergrösserung der Drehgeschwindigkeit gleichen Schritt, und ebenso nimmt der Weg, welcher in lothrechter Richtung während einer Umdrehung zurückgelegt wird, ab. Von der beginnenden bis zur stabilen Rotationsstellung stellen die Bahnen der peripherischen Punkte des Körpers Schraubenlinien um eine lothrechte Schwerpunktsaxe dar, deren Radius nach abwärts wächst.

Von der Erlangung der stabilen Rotationsstellung an wurden dagegen (abgesehen von den bereits erwähnten sich

wiederholenden kleineren Oszillationen) von den peripherischen Punkten gleichförmige Zylinderschraubenbahnen beschrieben. Taf. VIII Fig. 3 sind die Bahnen dreier Punkte der Längsaxe der untersuchten Ahornfrucht dargestellt, wie sie in der Vertikalprojektion auf aufgerollten und mit den sich entsprechenden Kurvenenden aneinandergefügten Zylindermänteln sich darstellen. s bedeutet die Projektion des Schwerpunktes, n diejenige des Nussendes und f die des Flügelendes der Längsaxe. Das durch die Kurven n, n . . und f, f . . . abgeschnittene Stück jeder beliebigen Ordinate stellt immer die jeweilige kleinste Vertikalprojektion der Längsaxe auf den Zylindermantel dar. Die Ordinaten o—6 geben die Grenzen je einer horizontalen Umdrehung des Organs an.

Nehmen wir an, es werde mit dem 4 cm langen Flügelende der Längsaxe des Organs als Radius ein horizontaler Kreis beschrieben und wir lassen den Kreis sich senkrecht nach abwärts bewegen, so beschreibt dessen Umfang einen geraden Zylindermantel, welchen wir für die Darstellung in fünffacher Reduktion benützten. Der wirkliche Umfang eines solchen Zylindermantels beträgt 25,13 cm, der Einfachheit der Darstellung halber sind nur 25 oder vielmehr $^1/_5$ davon, also 5 cm angenommen, und ebenso sind alle Längen, auch die senkrechten auf $^1/_5$ reduzirt, so dass die Darstellung ein im Verhältniss möglichst richtiges Bild der Bewegung der 3 Punkte gibt. Wir denken uns nun das freifallende Organ innerhalb dieses Zylindermantels sich so vorwärts bewegen, dass sein Schwerpunkt immer in die Axe des Zylinders fällt, was für den Anfang der Bahn, wie wir gesehen haben, nicht richtig ist, später aber thatsächlich zutrifft. Die Projektion der Längsaxe auf eine jeweils durch den Schwerpunkt gelegte Horizontalebene falle dabei immer in die Richtung eines Zylinderradius, was ebenfalls anfangs nicht ganz zutrifft.

Die Punkte der Bahn, welche den geschilderten 4 Hauptstellungen entsprechen, sind mit 1.—4. St. bezeichnet. Die 3 Kurven welche rechts oben bei o und zwar mit den 3 Punkten n, s und f beginnen, fallen anfangs in ihrer vertikalen Projektion nahezu zusammen, treten dann ein wenig auseinander, indem die Kurve n . . . sich oberhalb und f . . .

unterhalb s . . . begibt, kreuzen sich sodann alle drei an einem Punkt, und n und f wechseln ihre Stellung zu s. f tritt über und n unter s und beide behalten von nun an dauernd diese relative Lage bei, indem sie sich bis zur 3. Stellung immer weiter von s entfernen. Von diesem Punkt an aber nähern sie sich wieder dauernd bis zur 4. Stellung.

Die Kurven überschreiten anfangs die Ordinate o bis zur Ordinate von 45° in einem, der übrigen Bewegungsrichtung entgegengesetzten Sinne, wenden dann bei Stellung 2 um und führen mit anfangs abnehmendem, später zunehmendem Winkel nach Stellung 3. Von hier nimmt der letztere dauernd ab und die Kurven nähern sich immer mehr horizontaler Richtung bis zur Stellung 4. Das Stück der Kurve von der 1. St. bis 2. St. entspricht der Bewegung während der Einnahme der zur Rotation geeigneten Stellung des Organs, bei der 2. St. dagegen beginnt die typische Rotationsbewegung. Von diesem Punkt an werden (abgesehen von den späteren Oszillationen) alle Bewegungen dauernd gleichsinnig. Die Abschnitte jeder beliebigen Ordinate, welche zwischen die Kurven f . . und n . . . fallen, stellen die kleinste Vertikalprojektion der Längsaxe des Organs für die zugehörige Stellung dar. Ihre Entfernung gibt damit ein deutliches Bild der jeweiligen Neigung der Längsaxe. Nur in dem ersten Augenblick des Falles, bei senkrechter Bewegung, fallen die Kurven in einer Linie und bei der Abscisse für 5 cm Fallhöhe (vgl. b Fig. 2) in einem Punkt zusammen.

Die Kurven f . . . und n . . . geben übrigens nicht den wirklichen Weg der projizirten Punkte an, sondern dieser Weg ist entsprechend der jeweiligen Entfernung der Punkte vom Zylindermantel kürzer. Nur bei der Abscisse für 5 cm berührt das oberste Ende f der Längsaxe selbst den Zylindermantel.

Was die Beziehungen der im Einzelnen beschriebenen Bewegung zu den verschiedenen Fallzeitabschnitten anlangt, so weiss ich hierüber aus Beobachtungen nichts ganz sicheres zu sagen. Die ganze geschilderte Bahn wird zurückgelegt in $^1/_5$ Meter Fallraum und vollzieht sich zu rasch (in etwas mehr als $^1/_2$ Sekunde) als dass man ohne ganz besondere mir nicht zu Gebot stehende physikalische Hülfsmittel die

sehr kleinen Zeitintervalle zwischen den einzelnen Bahnabschnitten, um welche es sich hier handelt, messen könnte. Andererseits ist für grössere Fallräume, für welche man die Zeitintervalle messen kann, die Bewegung selbst nicht mehr in ihren Einzelheiten zu kontroliren.

Eine nicht seltene Erscheinung bei der Bewegung dieser Früchte bleibt noch zu berücksichtigen. Sehr häufig beobachtet man, dass sie nicht in der bisher geschilderten Art sich senkrecht oder nahezu senkrecht zur Erde bewegen, sondern dass die Bahn des Schwerpunktes stärkere und zwar regelmässige Krümmungen zeigt. Dieselbe geht nämlich unter Umständen in eine Schraubenbahn über mit mehr oder weniger steilen Windungen. Diese werden in ruhiger Luft nach unten immer enger und steiler und schliesslich wird die Bahn, wenn der Fallraum hoch genug ist, wieder eine lothrechte. Man kann diesen Vorgang beim Abfallen der reifen Früchte im Herbst sehr häufig beobachten an Tagen mit ein wenig bewegter Luft. Ebenso bewegen sich aber auch in ruhiger Luft die Früchte bei Beginn ihrer Rotation nicht selten in solcher Bahn, und gehen erst allmählig in lothrechte über. In letzterem Falle sind die Windungen der schraubenförmigen Bahn nur viel enger und steiler als im vorigen. Man kann sehr leicht beobachten, dass die Richtung, in welcher die Spirale verläuft, die entgegengesetzte ist, wie die Richtung der Rotation. Diese spiralige Bahn tritt also nicht in der Regel auf, sondern nur unter gewissen Umständen. Sie kann bei allen rascher rotirenden Formen auftreten, braucht es jedoch nicht zu thun.

Früchte des Traubenahorn (Acer pseudoplatanus).

Es wurden gut ausgebildete, im Spätherbst 1887 von mir selbst gesammelte Exemplare benützt. Die Früchte sind etwas anders gestaltet, als die von A. platanoides. Die Vorderkante ist ebenfalls schwach gekrümmt, aber konvex, Die Nuss etwas zusammengedrückt kugelig, oder ein dreiaxiges Ellipsoid darstellend. Flügelende mehr abgerundet, der Flügel gegen die Nuss zu ähnlich wie gegen sein oberes Ende verschmälert. Die Nuss im Verhältniss zum Flügel schwerer und gleichzeitig mit bedeutend kleinerer Projektionsfläche.

Bei einem typisch ausgebildeten, ausgewählten Versuchsorgan, dessen Flügel fast ganz eben war und kaum eine Andeutung von Flächenkrümmung zeigte (Taf. II Fig. 13) wurde folgendes Verhalten beobachtet:

Aus natürlicher Fallstellung, also mit senkrecht gestellter Fläche und einer Neigung der Längsaxe von c. 50—52° zum Horizont, wobei das obere (Flügel-) Ende am tiefsten, die Nuss am höchsten sich befand, ging das genannte Versuchsexemplar nach einer längeren Reihe von Versuchen innerhalb 35 cm Fallraum zu deutlicher Rotation über. Innerhalb eines weiteren Fallraumes von 30 cm ging die anfangs in steiler Stellung vor sich gehende Rotation in eine solche in fast horizontaler Lage über. Beim Fall drehte sich das Organ, wenn es aus ganz genau vertikaler Flächenstellung fiel, immer mit der nämlichen Seite nach aufwärts und zwar mit der etwas konkaven.

Aus verschiedenen anderen Lagen kam das Organ innerhalb ähnlicher Fallräume zum Drehen, so bei senkrechter Stellung der Längsaxe mit nach oben gerichteter Nuss, ebenso, wenn man ihm eine quer etwas geneigte Lage gab, sowie aus horizontaler Flächenlage. Aus letzterer sogar am raschesten. Die nothwendige Fallhöhe betrug hier nämlich nur c. 26 cm, um deutlich erkennbare Drehung in schiefer Lage zu erzeugen. Aus den letzteren Fallstellungen drehte sich das Organ übrigens nicht mehr regelmässig mit seiner ein klein wenig konkaven Flügelseite nach oben, sondern häufig auch mit der anderen.

Bei genau senkrechter Stellung der Längsaxe, mit dem Nussende nach unten kam das Organ dagegen sehr spät zur Drehung und zwar erst nach Zurücklegung einer Fallstrecke von mindestens 2,50—2,75 m, einmal durchfiel es sogar 6 m ohne Drehung.

Ganz ähnlich verhielten sich viele andere geprüfte Organe, mit dem Unterschiede, dass stärkere Flügelkrümmung auch bei der letztgenannten ungünstigsten Fallstellung raschere Rotation herbeiführte.

Was die Flächenvertheilung beiderseits der Längs- und Queraxe dieser Früchte anlangt, so ergab die Messung bei dem abgebildeten Organ, welches sehr typische Verhältnisse

zeigte, folgendes Resultat: Die grösste Projektionsfläche mass 356,5 qmm, hievon fielen beiderseits der Längsaxe 198,25 und 158,30 qmm, beiderseits der Queraxe 307,6 und 48,9 qmm. Das erstere Verhältniss entspricht $\frac{1,252}{1}$, das zweite $\frac{6,3}{1}$, wobei die grössere Fläche je der hinteren und oberen Organhälfte entsprechen.

Unter sämmtlichen untersuchten Formen des Typus habe ich die eingehendsten Fallversuche aus grösseren Höhen mit vorliegender Art gemacht und gebe in nebenstehender Tabelle die Resultate bei 5 normal ausgebildeten Organen, von denen Nr. 4 das abgebildete und gleichzeitig zu den bereits genannten Versuchen benützte ist. V bedeutet die beobachtete Fallgeschwindigkeit pro Sekunde, v die aus Gewicht und Fläche für 3 = 1 berechnete Fallgeschwindigkeit und Lg die Leistungsgrösse. Da die Organe bei den verschiedenen Fallversuchen nicht gleichrasch in Rotation übergehen, auch bei grösster Sorgfalt in der genauen Einhaltung gleicher Fallstellung, so sind immer nur die höchsten erlangten Werthe aus sehr vielen Versuchen als mit einander korrespondirend und vergleichbar benützt.

Die Resultate dieser Tabelle zeigen, dass die Fallgeschwindigkeit abwechselnd zu und dann wieder abnimmt. Während der letzten 3 m ist immer eine mittlere Fallgeschwindigkeit vorhanden, welche zwischen die grösste und kleinste während der ersten 3 m beobachtete fällt. Sehr charakteristisch ist dabei, dass die mittlere Fallgeschwindigkeit, abgesehen von kleinen Differenzen, welche aber positiv und negativ sein können, während der beiden Hälften des Gesammtfallraumes einander gleich bleibt.

Tabelle Nr I.

Organ-Nummer	Gewicht in mgm	Projekt.-fläche in qmm	Gesammt-fallzeit auf 6 m in Sek.	Fallzeiten (in Sek.) während					Fallzeit pro m während d. letzt. 3 m in Sek.	V aus d. letzt. 3 m berechn. in mm	v für 3 = 1	Lg
				des 1. m	2. m	3. m	der ersten 3 m	der letzten 3 m				
1	104,5	334	5,6	0,9	1,1	0,9	2,9	2,7	0,9	1111	2179	1,961
2	100,5	253	5,4	0,8	0,8	1,0	2,8	2,8	0,93	1071	2454	2,291
3	96,5	250	5,6	0,8	1,0	1,0	2,8	2,8	0,93	1071	2420	2,259
4	142,5	356,5	5,2	0,8	0,8	1,0	2,6	2,6	0,86	1154	2462	2,133
5	122	297	5,4	0,8	1,0	0,8	2,6	2,8	0,93	1071	2496	2,33

Um die verschiedene Geschwindigkeit während kurzer Fallstrecken genauer kennen zu lernen, wurden schliesslich eine Reihe von Fallversuchen auf 3 m Höhe mit Intervallen von nur 25 cm gemacht. Dieselben ergaben alle sehr übereinstimmende Resultate. Das Versuchsorgan Nr. 4 der vorigen Tabelle, sowie ein zweites nicht darin enthaltenes, welches ich Nr. 6 nennen will, lieferten beispielsweise die in der Tabelle Nr. II angeführten Ergebnisse.

Tabelle Nr. II.

Fallraum in cm	Fallzeit in Sek. Vers.-Org. Nr. 4	Vers.-Org. Nr. 6
0—75	0,6	0,6
75—100	0,2	0,2
100—125	0,2	0,2
125—150	0,33	0,3
150—175	0,07	0,1
175—200	0,2	0,3
200—225	0,4	0,3
225—250	0,2	0,2
250—275	0,2	0,2
275—300	0,2	0,2

Die beiden Organe ergeben somit zweimalige bedeutende Fallverlangsamungen, welche jedesmal durch eine Strecke bedeutenderer Fallbeschleunigung unterbrochen werden. Diese Schwankungen treten bei beiden Organen fast genau an den gleichen Stellen des Fallraumes auf, und entsprechen sich vollkommen, namentlich wenn man bedenkt, dass für so kleine Fallräume die Genauigkeit der Zeitmessung keine allzu grosse sein kann. Die Zahlen 0,33 und 0,07 für das Organ Nr. 4 beruhen auf Schätzung. Messbar sind

solche kleine Zeitdifferenzen, welche unter 0,1 Sek. herabsinken, nicht mehr.

Über 3 m Fallraum konnten diese Versuche nicht fortgesetzt werden. Indessen muss, nachdem die mittlere Geschwindigkeit auch während der folgenden 3 m gleichbleibt, eine neuerliche Geschwindigkeitsabnahme eintreten. Die mittlere Geschwindigkeit beträgt nämlich 0,216 Sek. auf je 25 cm Fallraum. Es müssen somit, da eine dauernde Geschwindigkeitsabnahme unmöglich ist, auch weiterhin ähnliche, wenn auch nicht ganz so starke Schwankungen wie anfangs sich wiederholen. Wiederholte Prüfungen gaben immer das gleiche Resultat, auch bei allen anderen Arten, so dass mit diesen Versuchen abwechselnde Zu- und Abnahme der Fallgeschwindigkeit sicher gestellt ist.

Es erinnert dies Verhalten sofort an dasjenige der oszillirenden Formen des X. Typus, mit dem Unterschiede, dass hier alle geprüften Organe ohne Ausnahme dasselbe zeigten.

Früchte von Machaerium angustifolium (Papilion.).

Dem Münchener Staatsherbarium angehörige, von Martius in Brasilien gesammelte Exemplare standen zur Verfügung.

Die sehr charakteristischen, messerförmigen Organe sind 1 samige Hülsen mit von der Seite etwas zusammengedrückter, walzlicher Nuss und sehr verlängertem, steif lederartigem, flachem oder unregelmässig ein wenig gekrümmtem Flügel. Der vordere, ein wenig konkav ausgeschweifte Rand ist etwas verdikt.

Ein typisch ausgebildetes Versuchsexemplar mit ganz ebenem Flügel (Taf. II Fig. 14) wog 94 mgm und mass 355 qmm Flächeninhalt. Das Flächenverhältnis der Hinterhälfte zur Vorderhälfte betrug trug $\frac{211}{144} = \frac{1,46}{1}$ und dasjenige der Oberhälfte zur Unterhälfte $\frac{308}{47} = \frac{6,55}{1}$.

Die Fallzeit auf 6 m Fallraum betrug 6 Sek. Hievon kamen auf den

1. m 1,0 Sek.
2. „ 1,2 „
3. „ 0,8 „
4.—6. „ 3 „ also auf 1 m 1 Sek.

Gegenüber der beobachteten Fallgeschwindigkeit von 1 m pro Sek. ergibt sich für 3 = 1 aus Gewicht und Fläche die theoretische Geschwindigkeit 2004 mm. Die Leistungsgrösse ist demnach $\frac{2004}{1000} = 2{,}004$.

Samen der Fichte (Picea excelsa).

Die Samen wurden im Herbste 1887 von mir selbst gesammelt. Der Flügel ist hier häutig durchscheinend, ohne Nerven, die Nuss länglich eiförmig, am untern Ende zugespitzt. Ersterer besteht aus einer dünnen häutigen Membran, deren unterster Theil mit der Nuss verklebt ist, wie bei allen geflügelten Coniferen. Die Flügelfläche ist meist etwas gekrümmt. In der Regel verläuft die Richtung stärkster Krümmung unter spitzem Winkel mit der Längsaxe von vorn und unten nach hinten und oben. Eine grössere Zahl (66) von wohlausgebildeten Samen ergab als durchschnittliches Gewicht 4,96 mgm, wovon der Flügel 0,864 mgm, die Nuss 4,105 mgm wog, der Flügel also etwas über $^1/_5$ der Nuss, wobei das unterste Stück des Flügels, welches mit der Nuss verklebt ist, der Nuss zugerechnet wurde.

Bei einem genau geprüften Versuchsorgan, welches nur Spuren von Flächenkrümmung zeigte, betrug das Gesammtgewicht 4,7 mgm. Der gesammte Flächeninhalt mass 58,9 qmm wovon 7,4 qmm auf die Nuss und 51,5 auf den Flügel kamen. Das Verhältniss war also $^1/_7$. Die beobachtete Fallgeschwindigkeit war für 6 m Fallhöhe 10,4 Sekunden. Hievon kamen auf den

1. m 1,6 Sek.
2. „ 2,0 „
3. „ 1,6 „
4.—6. „ 5,2 „ somit auf 1 m 1,73 Sek.

Es gibt das eine Geschwindigkeit von 0,57 m Fallraum in der Sekunde. Die Längsaxe des Organs machte nach

Eintreten stabiler Rotationsstellung einen Winkel von etwa 10° zur Horizontalen.

Die aus Gewicht und Fläche für 3 = 1 berechnete Geschwindigkeit ergibt dagegen 1,1, also ist die Leistungsgrösse $= \frac{1,10}{0,57} = 1,93$.

Eine grössere Zahl (17) anderer Samen, welche ich für verschiedene Fallhöhen prüfte, gab ganz ähnliche Resultate. Die Fallgeschwindigkeiten für 6 m Höhe differirten dabei im Einzelnen ziemlich beträchtlich und unter den 17 untersuchten schwankte sie zwischen 7 und 12 Sekunden. Alle diese Samen drehten sich sehr rasch nach dem Fallenlassen. Einzelne kommen indess vor, welche erst spät zum Drehen gelangen, sehr vereinzelte drehen gar nicht.

Die Leistungsgrösse der Fichtensamen bleibt im Allgemeinen etwas hinter derjenigen der bisher genannten Formen zurück. Sie stieg bei den von mir geprüften Exemplaren nie ganz bis zu 2,0 an. Es zeigten dabei die flacheren Formen eine um weniges höhere Leistungsgrösse als diejenigen mit stärker gekrümmter Flügelfläche.

Die Samen zeigen unter ähnlichen Umständen wie die Ahornfrüchte ebenfalls eine etwas spiralige Bahn, wenigstens meist. Im übrigen jedoch nicht so ausgeprägt wie jene und in manchen Fällen überhaupt nicht. Es sind dies immer Samen, welche nicht sehr rasch und unter stärker geneigter Stellung der Längsaxe rotiren.

Samen der Tanne (Abies pectinata).

Es wurden mehrere Jahre alte Samen des botanischen Institutes benützt. Die Samen haben im Umriss die Gestalt eines etwas verlängerten ungleichseitigen Dreiecks, dessen beide stumpfwinklicheren Ecken abgerundet sind. Das spitzwinkliche Eck wird von der länglichen sehr unregelmässig gestalteten Nuss eingenommen. Der Flügel ist ziemlich unregelmässig längst gefaltet, der Länge nach ein wenig konkav, der Quere nach Sförmig gekrümmt und beim Falle stellen sich die Samen meist so, dass der Hinterrand aufwärts, der Vorderrand abwärts gekrümmt ist.

Wegen des grösseren Gewichtes kommen diese Samen meist nicht so rasch zur Rotation, wie die der übrigen einheimischen Coniferen.

Ein wohlausgebildetes Versuchsorgan (Taf. II Fig. 20), wog 58 mgm und mass 231 qmm Fläche. Dasselbe, welches bei 65 cm Fallhöhe in deutliche Drehung überging, legte 6 m Höhe in 5 Sek. zurück, hievon den

1. m in 0,7 Sek.
2. „ „ 0,8 „
3. „ „ 0,7 „
4.—6. „ „ 2,8 „ also 1 m in 0,93 Sek.

Es macht dies eine mittlere Fallgeschwindigkeit von 1,06 m pro Sek. Die Geschwindigkeit für die einzelnen Fallhöhen zeigt wieder Abnahmen und Zunahmen wie bei allen Organen des gleichen Typus.

Die aus Gewicht und Fläche für $\zeta = 1$ berechnete theoretische Fallgeschwindigkeit beträgt 1,962 m, somit war die Leistungsgrösse $= \frac{1,952}{1,06} = 1,822$.

Auch viele Tannensamen machen, wie die übrigen Organe dieses Typus, unter gewissen Umständen anstatt einer lothrechten eine spiralige Bahn. Die Drehgeschwindigkeit scheint hier etwas geringer wie bei den Ahornfrüchten.

Samen der Kiefer (Pinus sylvestris).

Die Samen (Fig. 19 Taf. II) sind sehr verlängert, der Vorderrand gerade oder auch ein wenig konkav ausgeschweift, die Nuss ist ähnlich wie die von Picea excelsa. Der Flügel endigt in eine ziemlich lang ausgezogene Spitze. Die Flügelfläche ist der Länge nach ziemlich stark S förmig gekrümmt. Beim Falle stellen sich die Samen fast immer so, dass die Konkavität der Flügelbasis nach aufwärts, die der Flügelspitze nach abwärts gerichtet ist.

Die Länge des Flügels ist sehr verschieden, meist aber sind, wie mir nach einer grösseren Zahl von Samen scheint, mit einem längeren etwas schmäleren Flügel kleinere und mit dem kürzeren und etwas breiteren Flügel grössere Nüsse verbunden.

Ein Same der ersteren Sorte, welcher 2,6 mgm wog, durchfiel 6 m in 7 Sek. wovon den

1. m in 2,2 Sek.
2. „ „ 2,4 „
3. „ „ 2,4 „
4.–6. „ „ 7 „ also je 1 m in 2,3 Sek.

Die mittlere Geschwindigkeit betrug somit in der Sekunde 0,43 m. Die Neigung seiner Längsaxe zur Horizontalen während der Rotation betrug ca. 30—32° und die Rotation ging relativ langsam vor sich.

Ein Same der zweiten Sorte von dem Gewichte 7,5 mgm durchfiel 6 m in 7,2 Sek. davon den

1. m in 1,0 Sek.
2. „ „ 1,4 „
3. „ „ 1,2 „
4.–6. „ „ 3,6 „ also je 1 m in 1,2 Sek.

Die mittlere Geschwindigkeit betrug somit pro Sek. 0,83 m. Die Neigung der Längsaxe während der Rotation betrug ca. 6° und die letztere erfolgte sehr rasch.

Manche Samen der Kiefer rotiren nicht, es sind das regelmässig solche mit sehr langem Flügel. Sie fallen dann ziemlich rasch in steil schraubiger Bahn mit der Nuss voraus, im Prinzip ähnlich wie die an einer Längsseite stark belasteten Samen von Bignonia cyrtantha, oder richtiger wie die Eschenfrüchte es hie und da einmal thun.

Gerade in Folge der verlangsamten Rotation und des durch geringes Gewicht gleichzeitig sehr verlangsamten Falles ist nun hier ein für gewisse Eigenschaften der Bewegung sehr lehrreicher Vorgang zu beobachten. Man kann nämlich ganz deutlich sehen, wie die Fallgeschwindigkeit in Zwischenräumen zu- und abnimmt, wie also gewissermassen ein stossweis beschleunigtes Fallen und dann wiederum Verzögerung eintritt. Manchmal, namentlich kurz nach Beginn der Rotation fallen diese Organe sogar ein oder das andere Mal ganz aus ihrer drehenden Bewegung heraus, nehmen dann aber sofort wieder Drehlage an und beginnen von neuem zu rotiren. Bei absolut ruhiger Luft werden diese Aenderungen in der Fall- und Drehgeschwindigkeit allmählich unmerklicher, so dass die Bewegung dann in eine, wenig-

stens für das Auge relativ gleichmässige übergeht. Den Vorgang während des aus der Rotation fallens kann man im Einzelnen nicht genau verfolgen, dagegen erkennt man nach oft wiederholter längerer Beobachtung, dass derselbe mit dem Moment der Verlangsamung der Fallbewegung und Beschleunigung der Drehung zusammenfällt.

Sehr selten kommt es auch vor, dass ein Same immer wieder aus der Rotation herausfällt, so dass hiedurch, wenn sich dies regelmässig fortsetzt, eine höchst merkwürdige Bewegung entsteht. Es wurde dieser Fall ein einziges Mal beobachtet. Es war ein ebenfalls sehr verlängertflügeliger Samen mit ausserdem etwas schwach belasteter Vorderkante. Der Flügel war gleichzeitig der Länge nach besonders stark gekrümmt. Es wurden hier die Oszillationen um die Längsaxe bis zum Überkippen fortgesetzt. Leider ging der Same bei den Versuchen zu Grunde.

Was das Auftreten der zur Rotationsrichtung gegensinnigen Spiralbahn bei den Kiefernsamen anlangt, so ist es, wenn auch nicht sehr ausgeprägt, bei den Samen mit schwerer Nuss und kürzerem Flügel zu beobachten, fehlt dagegen vollkommen bei den leichten langflügeligen Formen.

Früchte von Carpinus betulus (Cupulif.).

Die Nuss ist in eine dreilappige am Grunde konkav-konvexe Cupula eingebettet, deren Mittellappen sehr verlängert ist und einen einseitigen Flügel darstellt. Die Nuss ist im Grunde der Höhlung nicht ganz in der Mittellinie des Organes, sondern in schiefer Stellung etwas nach einer Seite verschoben angebracht, ebenso ist immer eine gewisse Unsymmetrie, sowohl in der Gestalt als in der Krümmung der beiderseitigen Flächenhälften der Cupula vorhanden. Der Schwerpunkt liegt dabei nie in der Mittellinie, sondern immer etwas seitlich, entsprechend der Stellung der Nuss.

Beim Fall stellt sich das Organ unter ziemlich rascher Drehung um seine zur Flächenausdehnung vertikale Schwerpunktsaxe fast horizontal. In der Regel dreht es sofort seine konvexe Fläche nach abwärts, ganz wie die napfförmigen Organe und fällt dann unter beschleunigter Horizontaldrehung mit etwas geneigter Längsaxe. Manchmal aber fällt es auch

umgekehrt mit der konkaven Fläche nach abwärts gerichtet und in diesem Falle stellt es sich mit seiner Längsaxe ganz horizontal und fällt dann ein wenig langsamer. Letzteres ist jedoch nur sehr ausnahmsweise der Fall, wenn der Flügel stark nach abwärts gebogen ist, so dass die Flächenkrümmung der Länge nach stark Sförmig erscheint.

Häufig tritt dieser letztere Fall ein, wenn man eine Frucht in die Höhe wirft. Aufwärts sich bewegend nimmt sie dann die normale Stellung mit der konvexen Fläche gegen den Luftwiderstand gerichtet ein und beginnt zu drehen.

Durch die ihr innewohnende lebendige Kraft dieser Drehung überwindet sie dann die beim Zurückfallen sofort zur Geltung kommende Drehwirkung, welche die konkave Fläche nach aufwärts zu drehen sucht uud behält so auch beim Herabfallen nunmehr ihre Stellung bei. Die Drehung wird dann wiederum beschleunigt. Die etwas grössere Fallverzögerung, welche sich schon in der horizontaleren Stellung der Längsaxe äussert, beruht hier auf der ansehnlicheren Grösse des Coeffizienten 3, indem der Widerstand gegen die konkave Fläche denjenigen gegen die konvexe überwiegt.

Im einzelnen schliesst sich die Mechanik der Horizontalstellung und Drehung vollkommen an diejenige des XII. Typus an, weswegen diese Organe trotz ihrer etwas abweichenden Gestalt hierherzurechnen sind.

6 m Fallhöhe wurden von einem mittelgrossen, wohlausgebildeten Organ in 5 Sek. durchfallen, hievon die ersten 3 m in 2,5 Sek. und die letzten 3 m ebenfalls in 2,5 Sek. Dabei begann die Rotation nach 50 cm Fallhöhe. Der anfangs in Folge steiler Stellung etwas beschleunigte Fall wird nach Horizontalstellung wiederum mehr verzögert, genau wie bei allen übrigen Formen des Typus.

Samen von Cedrela brasiliensis (Cedrelac.)

Alle bisher berechneten Organe rotiren schnell und stellen sich mit Ausnahme gewisser Formen der Kiefernsamen bei der Funktion nahezu horizontal. Die Grösse der Projektionsfläche der letzteren ist bei ihrer Sförmigen Flächenkrümmung und relativen Kleinheit nicht so leicht genau festzustellen, in Folge dessen suchte ich nach grösseren Organen,

welche bei möglichst langsamer Rotation eine möglichst steile Stellung zum Horizont einnehmen, um dieses Verhalten auf seine Leistungsgrösse zu prüfen. Die genannte Cedrela-Art bot in einzelnen ihrer Samen ein geeignetes Beispiel hiefür.

Die dem kgl. Staatsherbarium in München gehörigen Samen haben im Allgemeinen breit messerförmige Gestalt und ihre Fläche ist manchmal nach 2 Richtungen, der Länge wie der Quere nach ziemlich stark und zwar in umgekehrtem Sinne konkav-konvex gekrümmt. Die Nuss ist länglich flachgedrückt, der Flügel häutig ohne Nerven. Die Mehrzahl der paar mir zur Verfügung stehenden gut ausgebildeten Samen besass übrigens ebene Flügel.

Ein zu Versuchen dienendes Organ (Taf. VIII Fig. 11) mass 32,5 mm grösste Länge auf 9 mm grösste Breite. Seine grösste Projektionsfläche betrug 216 qmm, sein Gewicht 11,75 mgm. Der Schwerpunkt befand sich 7 mm vom Nussende entfernt und fiel gerade noch in den Körper der Nuss herein. Die Flächenvertheilung beiderseits der Queraxe entsprach dem Verhältniss 30 : 186, beiderseits der Längsaxe, d. h. der Axe, in Bezug auf welche der Körper das kleinste Trägheitsmoment besass, und deren Lage nur ganz beiläufig zu schätzen war, etwa 85 : 131. Diese Axe (z) machte hier mit der eigentlichen Körperlängsaxe einen spitzen Winkel. Die oben bereits beschriebene doppelte Flächenkrümmung des Organs war sehr stark ausgeprägt, so dass dasselbe gewissermassen eine gebogene seichte Rinne darstellte.

Aus längshorizontaler Fallstellung, mit senkrecht nach abwärts gerichteter, belasteter Längskante ging das Organ sofort in typische Funktion über, so dass es bereits nach 10 cm Fallhöhe seine stabile Rotationslage angenommen hatte. Aus längshorizontaler Stellung mit abwärts gerichteter Hinterkante, sowie aus längssenkrechter Stellung kam es erst nach 60—70 cm Fallhöhe zur Rotationslage. Die erstere Fallstellung wurde daher ausschliesslich zu den Versuchen gewählt.

Das Organ stellte sich dabei ausschliesslich so ein, dass die Längskonkavität nach abwärts (Taf. VIII Fig. 12) und die Querkonkavität nach aufwärts gerichtet war. Die Längsaxe des Organes machte mit dem Horizont einen Winkel

von etwa 52°. Die Drehungen konnte man ausnahmsweise hier zählen und zwar betrug deren Zahl nicht ganz 6 auf die Sekunde.

6 m Fallhöhe wurden in 12,8 Sek. durchfallen, hievon die ersten 3 m in der Hälfte der Zeit, so dass sich auch hier auf grössere Fallräume die mittlere Geschwindigkeit gleich blieb. Letztere betrug demnach pro Sek. 600 : 12,8 = 46,87 cm.

Während der ersten 3 m ergab sich für Intervalle von je 50 cm folgendes Resultat:

Fallraum in cm	Fallzeit in Sek.
0—50	1,0
50—100	1,2
100—150	1,0 (0,9)
150—200	1,0
200—250	1,2
250—300	1,0

Auch hier wurden zum Vergleich nur die höchsten erlangten Werthe aus vielen Versuchen benützt. Die Schwankungen zwischen den einzelnen Versuchen waren übrigens gering. Die eingeklammerte Zahl 0,9 wurde für die Fallhöhe vom 100.—150. cm bei einer zweiten Versuchsreihe erlangt, welche im übrigen mit der ersten ganz übereinstimmte. Auch in diesem Falle sehen wir also ungleiche Fallgeschwindigkeit.

Gegenüber der beobachteten mittleren Fallgeschwindigkeit V = 46,87 cm ergibt sich bei Berechnung aus Gewicht und Projektionsfläche v = 34 cm, somit ist Lg = 34 : 46,87 = 0,72. Wir sehen also hier eine ganz aussergewöhnlich geringe Leistungsgrösse, wie sie sonst beim XII. Haupttypus nicht beobachtet wurde und jedenfalls äusserst selten vorkommt.

Der Grund derselben liegt einerseits in der steilen Stellung der Fläche zum vertikalen Luftwiderstand, andererseits in der starken konvexen Querkrümmung der Fläche, welche beiden Umstände den Luftstrahlen ganz ausserordentlich erleichterten Abfluss gestatten.

Ich habe zum Vergleich die Geschwindigkeit berechnet, welche sich aus der horizontalen Projektionsfläche des Or-

gans bei 52^0 Neigung zum Horizont ergibt. Diese Projektionsfläche ist, wenn wir die Querneigung vernachlässigen, wie im allgemeinen Theil ausgeführt wurde, gleich der wirklichen grössten Projektionsfläche, multiplizirt mit dem Kosinus des Neigungswinkels, also

$$216 \cdot \cos 52^0 = 133 \text{ qmm};$$

führt man diese Grösse in die Widerstandsgleichung, so erhält man eine theoretische Fallgeschwindigkeit $v = 43{,}36$ cm und für diese Fläche wäre das Verhältniss $v : V = 0{,}92$, also wenigstens eine Leistungsgrösse, welche sich 1 nähert. Dabei ist aber ausser der Querneigung auch die quere Konvexität gar nicht einmal in Rechnung gezogen.

Solches Verhalten ist als eine grosse Ausnahme im XII. Haupttypus zu betrachten. Wie es scheint, kommen Organe, welche sich in dieser Weise bewegen, überhaupt nur ausnahmsweise unter einer meist grossen Mehrzahl von normal ausgebildeten bei manchen Arten vor.

Wie aus den späteren Ausführungen und Versuchen zur Mechanik der Bewegung erhellt, ist die geneigte Lage bei der Funktion und die daraus resultirende geringe Leistungsfähigkeit namentlich durch die geringe Rotationsgeschwindigkeit bedingt. Letztere hängt ihrerseits an der starken Querkrümmung, welche bedeutende Rotationswiderstände schafft. Wir sehen also hier gerade die Ausbildung, welche im X. Haupttypus die wesentliche Ursache der oft ausserordentlich hohen Leistungsgrösse ist, den Grund für abnorm geringe Leistung abgeben.

Die sonst für den XII. Haupttypus so charakteristischen gegenläufigen Spiralbahnen fehlen hier ganz. Es hängt dies, wie ebenfalls später näher begründet wird, daran, dass die Axe, um welche die Rotation vor sich geht, nicht mit einer stabilen Hauptträgheitsaxe zusammenfällt, sondern diese unter ziemlich grossem Winkel schneidet.

Leistungsgrösse des Typus.

Die Übereinstimmung in der Leistungsgrösse der grossen Mehrzahl der hierhergehörigen Formen ist eine ge-

radezu auffallende. Mag die Grösse und Gestalt der Organe noch so sehr wechseln, der Unterschied in ihrer jeweiligen Leistungsgrösse ist relativ gering. Den geringsten Betrag unter den typischen, rasch rotirenden Formen ergaben die Samen der Tanne. Für 3 = 1 war derselbe bei dem berechneten Versuchsorgan $\frac{1{,}952}{1{,}06} = 1{,}822$. Die grössten Zahlen ergaben Ahornfrüchte. Acer pseudoplatanus hielt sich in der grossen Mehrzahl der Fälle bedeutend über 2 und erreichte mit 2,33 die oberste überhaupt beobachte Grenze der Leistungsfähigkeit des Typus. Der Grund der hohen Leistungsfähigkeit liegt hier, wie im X. Typus, an den Oszillationen um die Längsaxe, nur treten dieselben im vorliegenden Falle immer ein und sind nicht durch quere Flügelkrümmung des Organes bedingt. Die ganz flachflügeligen Formen zeigen im Gegentheile die höchste Leistungsfähigkeit in der Ausnützung des vertikalen Luftwiderstandes.

Diesen typischen Formen stehen gegenüber einzelne Ausnahmsbildungen mit quer stärker gekrümmter Fläche. Damit geht einher langsame Rotation und steil geneigte Einstellung und diese bedingen wieder sehr verminderte Leistungsgrösse. Ein Beispiel hiefür bietet der berechnete Cedrela-Same, dessen Leistungsgrösse nur $\frac{34}{46{,}87} = 0{,}72$ betrug.

Im Vergleich mit der Leistungsgrösse der anderen Haupttypen muss man im übrigen von solchem ausnahmsweisen Verhalten absehen, so lange nicht typisches Auftreten der betreffenden Ausbildung für manche Arten nachgewiesen ist.

Zur Mechanik der Bewegung.

Wie aus der Schilderung des Verhaltens der einzelnen näher untersuchten Formen hervorgeht, ist die Geschwindigkeit, mit welcher die hieher gehörigen Organe, wenn man sie aus senkrechter Stellung ihrer Längsaxe mit nach unten gerichteter Nuss fallen lässt, eine geneigte Stellung annehmen und deutlich zu rotiren beginnen, eine verschiedene. Man kann solche Verschiedenheit aber auch an den Organen

derselben Art beobachten. Dieselbe hängt erstens davon ab, ob die Flächenvertheilung beiderseits der Queraxe eine mehr oder weniger ungleiche ist und ob Flächenkrümmung der Flügel ihrer Länge nach vorhanden ist. Je grösser der Unterschied in der beiderseitigen Flächengrösse ist, also je exzentrischer der Schwerpunkt der Länge nach gelegen ist, um so später wird Schiefstellung des Organs eintreten, und ganz dasselbe ist der Fall, je ebener die Flügelfläche ist. Es lässt sich das sehr leicht an den natürlichen Objekten selbst, wie an Modellen beobachten und die Gründe für derartiges Verhalten sind bei verschiedenen Gelegenheiten so eingehend auseinandergesetzt worden, dass ich hier nicht mehr weiter darauf eingehe. Ausserdem ist für die Raschheit des Eintritts der drehenden Bewegung natürlich wesentlich die Grösse des Trägheitsmomentes des betreffenden Organes in Bezug auf die betreffende Axe.

Ganz dieselben Gründe für die Schiefstellung liegen vor, wenn man die Organe in längshorizontaler Stellung mit der schweren Vorderkante nach abwärts gerichtet fallen lässt, nur tritt sie hier viel rascher ein in Folge der weniger ungleichen Flächenvertheilung und des viel geringeren Trägheitsmomentes, wozu noch der seitlich stärker erschwerte Luftabfluss kommt, in Folge dessen relativ grösserer Ueberdruck auf die Flächenelemente des vorausgehenden Randes stattfindet.

Am raschesten tritt aber meist Schiefstellung und Beginn der Rotation ein bei horizontaler Lage der Längsaxe mit senkrecht nach abwärts gekehrtem Hinterrand (oder bei ähnlicher, nur etwas geneigter Lage mit tieferem Flügelende), indem hier in Folge der Verlängerung des Hebelarmes das statische Moment wächst und sofort die für den Beginn der horizontalen Rotation nothwendige Neigung der beiden Flächenaxen erzeugt wird.

Aus diesem Grunde wurde, wenn nicht ausdrücklich anders angegeben ist, die letztere Ausgangsstellung für die genaue Verfolgung der Bahn gewählt und ich gehe bei der mechanischen Betrachtung hier zunächst ebenfalls von ihr aus, indem ich mich an den Verlauf der Bewegung halte,

wie wir ihn bei einem Versuchsexemplar des Spitzahorns bereits genauer kennen gelernt haben.

Ausser der beschriebenen Fallversuchsreihe mit der genannten Frucht wurden Versuche mit künstlichen Modellen in verschiedener Weise angestellt. Dieselben gaben alle im Prinzip gleiche und um nichts genauere Resultate und ich verzichte desshalb, näher auf sie einzugehen. Auch mit weit grösseren Modellen lässt sich ohne Zuhülfenahme der Momentphotographie der Vorgang und die verschiedenen Lagen in den einzelnen Momenten der Bewegung nicht klarer stellen, als es dort bereits geschehen ist. Die Schwierigkeit liegt darin, dass mit zunehmender Grösse zunehmend grössere Fallstrecken zurückgelegt werden müssen, um zu analogen Stellungen zu gelangen. Damit wird aber die genauere Beobachtung ungemein erschwert. Bei der Raschheit der Bewegung sind die Hauptmomente, in welchen relative Gleichgewichtslagen in Bezug auf beliebige, im Raume horizontalen Schwerpunktsaxen oder Grenzstellungen erreicht werden, ohnehin für das Auge nicht genau verfolgbar. Diese Stellungen werden nämlich sehr rasch überschritten, ebenso wie jede andere momentane Stellung, ausser der endgültigen, nahezu stabilen Rotationsstellung der Längsaxe.

Betrachten wir also die gesammte Bewegung, wie sie in einigen Stellungen Taf. VIII Fig. 2, a—g und in den Kurven Fig. 3 dargestellt und pag. 256 bis 265 eingehend geschildert wurde, so können wir sie in zwei zeitlich gesonderte Vorgänge zerlegen, in einen ersten, welcher von der Ausgangsstellung bis zur beginnenden Rotationsstellung (1. bis 2. St. der Kurven) reicht und einen zweiten, welcher die ganze weiter folgende Bewegung umfasst. Den ersten könnte man als Einnahme der Drehlage oder als die Einstellung, den zweiten als die typische Bewegung in engerem Sinne bezeichnen.

a. Die Einstellung.

Dieselbe ist mechanisch nichts anderes, als eine durch den Luftwiderstand erzeugte relativ stärkere Verzögerung der Fallbewegung der leichteren Theile der Organe, welche bewirkt, dass Drehungen stattfinden, um die schwereren

Theile nach abwärts und die leichteren nach aufwärts zu drehen. Wesentlich sind für diesen Vorgang, wie wir gesehen haben, namentlich Drehungen um horizontale Raumaxen.

Sobald die geringste Neigung in dem obengenannten Sinne eingetreten ist, resp. sobald nicht nur das schwere Nussende, sondern auch die schwere Vorderkante etwas nach abwärts geneigt sind, beginnt die höchst charakteristische, von nun an dauernd gleichgerichtete, beschleunigte, horizontale Drehung um eine, im Raum vertikale, durch den Schwerpunkt gehende Axe. Das Eintreten dieser Drehung bezeichnet den Moment der Einstellung. Die Einstellung erfolgt im geschilderten Falle mit der Überschreitung von 14 cm Fallhöhe. (Fig. 2, c und 2. Stellung der Bahnkurve Fig. 3).

b. Die typische Bewegung.

Der Name „Einstellungslage" bezeichnet keine Gleichgewichtslage. Im Allgemeinen setzen sich Drehbewegungen fallender Körper fort, bis eine solche erreicht ist. In dieser muss die algebraische Summe aller statischen Momente gleich Null sein, also müssen alle Drücke sich das Gleichgewicht halten. Eventuell schreiten Drehbewegungen durch die erlangte lebendige Kraft über die Gleichgewichtslage hinaus fort. Es treten dann sofort entgegengesetzte Drehkräfte in Aktion. Werden diese nicht überwunden, sondern erzeugen sie Drehungen in umgekehrtem Sinn, so stellt dies bei Widerholung des Vorgangs ein Oszilliren um eine wirkliche Gleichgewichtslage dar.

Eine solche kann erreicht werden unter günstigen Umständen, d. h. wenn der Schwerpunkt nur in einer Richtung senkrecht zu einer der Hauptdimensionen verschoben ist, wie wir dies bei den Flugorganen des X. Typus sahen.

Bei den Organen der XII. Gruppe aber ist der Schwerpunkt nicht nur in der Richtung einer, sondern ausserdem noch in der Richtung der zweiten freien Hauptaxe, oder wenn man will, einfach längs einer beliebigen zu den Hauptdimensionen schiefwinkligen Axe verschoben. Solche Organe müssen nun thatsächlich, wenn sie eben sind, ausser in gewissen senkrechten Flächenstellungen auch in gewissen, ganz bestimmten Schieflagen und für letzteren entsprechende ganz

bestimmte Fallgeschwindigkeiten sich im Gleichgewicht bezüglich ihrer sämmtlichen Drehaxen befinden, indessen sind diese Stellungen so ausserordentlich labil, dass man kaum mehr von der Möglichkeit von Gleichgewichtslagen reden kann. Ausserhalb dieser Stellungen, und der dazu gehörigen Fallgeschwindigkeiten, also so gut wie immer, müssen somit Drehungen eintreten.

Vom 14. cm Fallhöhe (Fig. 2 c Taf. VIII) angefangen neigt sich, wie wir gesehen haben, nicht nur der Nusstheil, sondern auch die belastete Vorderkante nach abwärts, in Folge dessen geht von nun an die Richtung stärkster Neigung der Platte von oben und hinten nach unten und vorn und es entstehen dementsprechend ausser den, den Flügel aufwärts drehenden vertikalen auch in der Horizontalprojektion jener Richtung wirksame horizontale Widerstandskomponenten, welche entsprechend der Grösse ihres Momentes Horizontaldrehung um eine im Raum vertikale Schwerpunktsaxe erzeugen.

Diese horizontal drehenden Kräfte entstehen mit dem ersten Neigungsbeginn der Queraxe und dauern um so länger an, als in Folge der Verlegung der Längsaxe des Organes nahe an den vorderen Rand der Angriffspunkt der Resultirenden des Luftwiderstandes zwar nahe an sie heranrückt und schliesslich sie überschreitet, so dass die Vorderkante wieder aufwärts gedreht wird, aber letztere Aufwärtsdrehung geht bei der Kürze des Hebelarmes überaus langsam vor sich. In Folge der somit anfangs dauernd gleichsinnigen Neigung der Queraxe entsteht bedeutende Beschleunigung der vorwärts gerichteten horizontalen Drehung.

Es entspricht die anfängliche Abwärts- und dann folgende Aufwärtsdrehung der Vorderkante ganz dem gleichen Vorgange bei den Organen des X. Typus, wenn man sie aus horizontaler Flächenstellung fallen lässt, mit dem Unterschiede, dass sie hier unter anfangs zunehmender Schiefstellung der Längsaxe des Organes und unter horizontal projizirt krummliniger (Kreis-) Bewegung der einzelnen Theilchen des Organes vor sich geht. Dort sehen wir dagegen typisch dauernde Horizontalstellung der Längsaxe und

horizontal projizirt dauernd mehr oder weniger geradlinige Bewegung des ganzen Organes.

Mit der wachsenden Fallbeschleunigung wächst die Grösse des entgegen gerichteten Luftwiderstandes, ausserdem wächst speziell die Grösse der horizontal drehenden Komponenten mit der bis zum 25. cm Fallhöhe zunehmenden Querneigung, gegenüber derjenigen der senkrecht aufwärts gerichteten Komponenten.

Durch diese zunehmende horizontale Drehgeschwindigkeit kommen nun aber noch weitere Kräfte, welche wir bisher ganz vernachlässigt haben, zur Entstehung. In ihrer Wirkung sichtbar werden sie freilich erst vom 25. cm Fallhöhe an. Der Luftwiderstand gegen die beschleunigte horizontale Drehbewegung gewinnt nämlich in Folge der erzeugten bedeutenden Rotationsgeschwindigkeit rasch eine sehr ansehnliche Grösse. Dieser Luftwiderstand steigt aber mit dem Quadrate der Geschwindigkeit und zwar sowohl entsprechend der Winkelgeschwindigkeit der Drehung überhaupt als auch der Bogengeschwindigkeit der einzelnen getroffenen Flächentheilchen.

Nachdem die Weglänge, welche jeder einen Kreisbogen beschreibende Punkt ausserhalb der Drehaxe in der Zeiteinheit zurücklegt, in geradem Verhältniss zu der Grösse seines Abstandes vom Kreismittelpunkte, also seines Radius steht, so steht auch die in der Zeiteinheit erreichte Geschwindigkeit eines jeden, einen Kreisbogen beschreibenden Punktes oder Flächenelementes in geradem Verhältniss zu seinem Radius. Bei doppelter Entfernung von der Drehaxe durchläuft ein Punkt bei ein und derselben Winkelbewegung einen doppelt so langen Weg als bei einfacher Entfernung, besitzt also eine doppelt so grosse Geschwindigkeit. Der Luftwiderstand muss somit im Allgemeinen auf jedes einzelne ihm entgegen gerichtete Flächenelement mit dem Quadrat seines Abstandes von der Rotationsaxe drücken.

Wie die Drücke, welche die schief gestellte Unterfläche des Organs beim senkrechten Fall treffen, in ihre senkrechten und horizontalen Komponenten zerlegt werden können, so ist dies auch mit den Drücken der Fall, welche der, der

Rotation entgegengesetzte Luftwiderstand auf die ebenfalls schief gestellte obere Fläche ausübt.

Die Drücke auf die einzelnen Flächenelemente wachsen im Allgemeinen mit dem Quadrat der Entfernung der letzteren von der Drehaxe. Ihr statisches Moment ist also ein höchst bedeutendes, und zwar muss dasselbe, da bei gleicher Druckgrösse der an einem Hebel angreifenden Einzeldrücke deren statisches Moment in einfachem Verhältniss mit der Länge des Hebelarmes oder mit der ersten Potenz desselben wächst, hier mit der dritten Potenz des Radius zunehmen. Die Beschleunigung der Rotationsgeschwindigkeit muss demnach einerseits sehr rasch ihre Grenze finden, indem der horizontale Widerstand ihr das Gleichgewicht hält, andererseits muss das sehr bedeutende statische Moment der senkrecht nach abwärts wirkenden Druckkomponenten zunehmende Horizontalstellung der Längsaxe herbeiführen.

Im übrigen ist dabei noch folgender Umstand zu berücksichtigen: Während bei dem vertikal aufwärts gerichteten Widerstand gegen die Unterfläche der fallenden Platte die senkrechten Komponenten beiderseits der im Raume horizontalen Drehaxe einander gegensinnig wirken, wenigstens bei Gleichgewichtslage in Bezug auf diese Drehaxe, wirken die vertikalen Komponenten des Rotationswiderstandes einander gleichsinnig. Diejenigen, welche die obere Fläche (des Flügelendes) treffen, wirken um eine im Raum horizontale Axe abwärts drehend, die auf die untere Fläche (des Nussendes) treffenden um dieselbe Axe aufwärts drehend. Die beiden Gesammtmomente summiren sich also und suchen die Längsaxe der Platte horizontaler Stellung zu nähern.

Diese vertikale Drehung setzt sich so lange fort, bis die auf- und abwärts gerichteten Drücke einander das Gleichgewicht halten. Letzteres trat bei unserem Versuchsorgan mit einem Neigungswinkel der Längsaxe zum Horizont von etwa 7^0 ein.

Die Lösung des eigentlichen Problems bei der Bewegung des XII. Typus liegt also in dem Nachweis des Grössenunterschiedes der statischen Momente der das Flügelende auf- und abwärts zu drehen bestrebten Luftwiderstände. Der aufwärtsdrehende Widerstand wirkt nur im

einfachen Verhältniss der wirksamen Hebelarme der getroffenen Flächenelemente und der abwärts drehende wirkt mit dem Kubus derselben.

In der Figur 4 Taf. VIII ist der Versuch gemacht, das Verhältniss der wirklichen Druckgrössen der auf- und abwärts zu drehen strebenden Luftwiderstandskomponenten, schematisch darzustellen. Die Grösse der statischen Momente ist dabei nicht berücksichtigt, deren Unterschied würde in der Konstruktion natürlich noch weit grösser ausfallen. In Bezug auf etwas weitere Ausführungen dieser Verhältnisse, die Unzulässigkeit zahlenmässiger Berechnungsversuche sowie überhaupt einer prinzipiellen mathematischen Lösung dieses Bewegungsproblemes verweise ich auf die „Zusätze zum XII. Typus."

Die Wirkung der ab- und aufwärts gerichteten Druckkomponenten des Luftwiderstandes, welcher sich horizontaler Drehung einer nach ihren beiden Hauptrichtungen schief gestellten länglichen Platte um eine vertikale Axe entgegensetzt, lässt sich auf sehr einfache Weise zeigen, wenn man eine nicht zu steife längliche Papierplatte mit einer entsprechend gerichteten festen Axe versieht. Es lässt sich dies leicht ausführen, indem man z. B. ein Stückchen Kork an der betreffenden Stelle aufklebt und als Axe eine lange starke Nadel durchsticht. Dreht man nun das untere Ende der Nadel zwischen Daumen und Zeigefinger, so dass die untere Längskante der Platte bei der Drehung vorausgeht, so verursachen die parallel der Drehaxe wirkenden Druckkomponenten eine Abwärtsbiegung des betreffenden Plattenendes. Befestigt man die Axe in der Mitte einer zu ihr ähnlich gestellten, nur etwas stärker verlängerten Platte, so biegt sich das eine Ende wie vorhin nach abwärts, das andere, dessen obere Längskante vorausgeht, nach aufwärts.

Je nach dem Flächenverhältniss beiderseits der Längsaxe des Organs muss sich dasselbe auch gegenüber dem horizontal wirkenden Rotationswiderstand in Gleichgewichtslage zu stellen suchen, welche bei der wechselnden Rotationsgeschwindigkeit offenbar eine schwankende ist. Aus der, anfangs sehr steilen Lage gegen die Widerstandsrichtung

muss sich die Fläche des Organs somit in bis zu einem gewissen Grade zunehmend horizontale Lage drehen.

Diese Drehung überschreitet vermöge der einmal erlangten lebendigen Kraft die Gleichgewichtslage und sogar, wie aus den gemessenen Fallzeiten für kleine Intervalle, aus den Beobachtungen bei anfangs oder überhaupt intermittirenden Organen, und endlich aus der enormen Fallverzögerung der Organe hervorgeht, wiederholt die horizontale Lage. Es stellt sich dabei die schwere Vorderkante etwas höher als die leichte Hinterkante und das Verhalten entspricht ganz demjenigen bei den Oszillationen der Organe des X. Typus.

Tritt dieser Moment ein, so schraubt sich das Organ vermöge der ihm innewohnenden lebendigen Kraft, der horizontalen Drehung relativ aufwärts, d. h. seine Fallgeschwindigkeit verzögert sich. Die Drehgeschwindigkeit muss indessen nunmehr rasch abnehmen, da gegensinnig wirkende Druckkomponenten zur Geltung kommen und in Folge dessen muss sofort der schwere Nusstheil etwas herabsinken und auch die Vorderkante muss sich wieder abwärts neigen.

Nun treten neuerdings die ursprünglich wirksamen Kräfte in Aktion, die Drehung beschleunigt sich von neuem und so wiederholt sich nun dauernd immer wieder der gleiche Vorgang.

Zu den bisher geschilderten Kräften, welche den wesentlichsten Antheil an der gesammten Bewegung haben, kommt aber noch eine letzte Kraft hinzu, deren Existenz im Verhältniss zu den grossen Widerständen im lufterfüllten Raume zwar zurücktritt, welche aber nichts destoweniger vorhanden ist und eine gewisse Rolle spielen muss. Es ist nämlich die Zentrifugalkraft, welche bei grösseren Rotationsgeschwindigkeiten von Einfluss ist und welche im luftfreien Raume freidrehende Körper zwingt, um die Hauptträgheitsaxen zu rotiren.

Nach der früher ausgeführten Berechnung des Trägheitsmomentes in Bezug auf diese Axen ist die Vertikalaxe der Flugkörper des XII. Typus eine der beiden stabilen Hauptträgheitsaxen. Sie ist zwar nicht die stabilste, jedoch besitzt sie immerhin eine beträchtliche Stabilität und bei einem gewissen spitzen Neigungswinkel der momentanen

Drehaxe mit ihr hat der rotirende Körper das Bestreben, seine Axe ihr zu nähern, respektive sich um sie selbst zu drehen.

Sobald dieser Winkel erreicht ist, fällt die Momentanaxe innerhalb des Spielraums, in welchem sie nach der Vertikalaxe zu gravitirt. In Folge dessen rotirt letztere um dieselbe und sucht sich ihr zu nähern. Die Kraft, mit welcher dieses Bestreben vor sich geht, bewirkt aber, da die Momentanaxe mit der im Raume vertikalen Schwerpunktsaxe zusammenfällt, wenn wir die angestrebte Drehung in ihre 2 Komponenten zerlegen, einerseits eine Drehung um eine im Raum horizontale, zur Längsaxe des Organes senkrechte Schwerpunktsaxe und andererseits um eine zu dieser senkrechte, ebenfalls im Raum horizontale Schwerpunktsaxe. Die angestrebte Gesammtwirkung ist Abwärtsdrehung des Flügelendes und des Hinterrandes bis zu vollkommener Horizontalstellung der Fläche im Raume und Vertikalstellung zur Hauptträgheitsaxe.

Dies wird nun freilich nicht vollkommen erreicht trotz Zusammenwirkens aller genannten Kräfte, indem der vertikal aufwärts gerichtete Luftwiderstand mit der wachsenden Horizontalstellung ebenfalls bedeutend steigt und auf den Flügel aufwärts drehend wirkt. Ferner muss mit der Annäherung der Queraxe an horizontale Lage die drehende Kraft des dem Fall entgegengerichteten Luftwiderstandes und damit die Drehgeschwindigkeit selbst abnehmen. Indess tritt doch wenigstens momentan eine Stellung des Organs ein, in welcher sich alle Kräfte gegenseitig das Gleichgewicht halten.

Weiterhin muss diese Stellung freilich sofort wieder überschritten werden, und zwar in dem Sinne, dass die Längsaxe sich der Horizontalstellung zu sehr nähert. Ausserdem überschreitet die Queraxe ihre Horizontalstellung bis zu schwacher Aufwärtsdrehung des Vorderrandes, ganz entsprechend der gleichen Bewegung bei den Oszillationen des X. Typus. Obschon diese letztere Überschreitung der Horizontalstellung nicht direkt beobachtet werden konnte, ist sie doch ganz zweifellos, wie aus den früheren Ausführungen zur Genüge hervorgeht.

Eine bedingende Rolle bei der Horizontalstellung spielt die

Stabilität der Vertikalaxe nicht. Sie beschleunigt resp. hemmt nur ein wenig die jeweilige durch den Luftwiderstand für sich schon erzeugte Bewegung.

Eine vollkommene Gleichmässigkeit dieser höchst verwickelten Bewegung kann überhaupt nicht erreicht werden, da die absolute Gleichgewichtsstellung eine ganz überaus labile ist, welche in einer oder der andern Richtung immer neu überschritten werden muss. Ebene Organe mit möglichst stabiler Vertikalaxe werden zwar kleine aber sehr zahlreiche und kräftige Oszillationen um die Längsaxe machen und dadurch wird ihre Leistungsfähigkeit zur Ausnützung des vertikalen Luftwiderstandes auf das höchste Mass gesteigert. Es entspricht dies auch vollkommen den Versuchsresultaten an den natürlichen Organen. Das Prinzip der hohen Ausnützung des Luftwiderstandes durch die in Vertikalebenen vor sich gehenden, also in die Bewegungsrichtung fallenden Oszillationen entspricht so vollständig jenem bei den Oszillationen des X. sowie bei der vertikalen Drehung des IX. Haupttypus, dass ein nochmaliges Eingehen darauf überflüssig erscheint.

c. Einiges experimentelle.

Während die typischen natürlichen Organe, sowie ihre Modelle meist in nahezu horizontaler Stellung rotiren, so dass sie gegen hellen Hintergrund fast den Eindruck eines ebenen Rades machen, zeigen einige wenige andere bei der Rotation den Umriss eines mehr oder weniger spitzen Kegels. Man kann nun bei natürlichen Organen wie bei Modellen diesen Kegel immer spitzer machen, indem man z. B. durch Krümmungen oder Faltungen oder auch Ausfranzungen des Flügelrandes der Rotation Hindernisse schafft. Man kann so die Längsaxe während der Rotation bis zu Neigungen von c. 70^0 bringen. Im Übrigen ist für die Stellung der Organe und Modelle bei der Rotation neben der Grösse der Luftreibung wesentlich die Grösse und Vertheilung des Gewichtes ausschlaggebend und es ergibt sich dies sehr rasch bei den entsprechenden Versuchen mit Modellen, wie bei verschiedenartiger Ummodelung der natürlichen Objekte. Letztere wurde in der Art bewerkstelligt,

dass einmal der Flügel mit der Scheere allmählich immer mehr gestutzt und dann der jedesmalige Effekt durch Fallversuche beobachtet wurde.

Die Früchte des Bergahorns, welche namentlich hiezu benützt wurden, ergaben dabei, dass man die Flügel bis auf die Grösse des Umfanges der Nuss verkürzen kann, ohne dass die Geschwindigkeit der Drehung oder das Rotationsvermögen überhaupt leiden. Natürlich wird aber die Fallgeschwindigkeit eine immer grössere. Bei noch stärkerer Verkleinerung kommen die Nüsse nicht mehr leicht zur Rotation. Sobald sie indess zu rotiren anfangen, thun sie es sehr schnell.

Umgekehrt habe ich auch die Flügel der Bergahornfrucht durch Ankleben von dünnen, steifen, entsprechend zugeschnittenen Papierstücken verlängert, und zwar bis aufs 3fache. Anfangs funktionirten solche Früchte noch. Bekommt der Flügel aber etwa die doppelte Länge, so stellt er sich nicht mehr horizontal, sondern die Frucht fällt nun mit direkt vorausgehender Nuss senkrecht zu Boden, indem der Flügel nur ganz schwach drehend hin und herflattert. Solche Früchte kann man aber sofort wieder zum rotiren bringen, wenn man das angesetzte Flügelstück an der vordern Kante durch ein schmales aufgeklebtes Papierstreifchen oder durch ein Siegellacktröpfchen belastet. So kann man noch ein ziemliches Stück in der Vergrösserung der Flügel fortfahren, wenn man die entsprechende Belastung am vordern Rande anbringt. Die Rotation erhält sich dabei, wenn sie sich auch sehr verzögert.

Die natürlichen Organe wie die Modelle rotiren auch sehr rasch, wenn man sie kräftig in die Luft wirft, und zwar in welcher Richtung immer, ob in die Höhe, ob abwärts oder in horizontaler Richtung. Ferner rotiren sie, wenn man ihr schweres Ende mit einem feinen Faden am Ende eines Stabes befestigt und dieses rasch durch die Luft führt. Schliesslich funktioniren sie auch dann, wenn man sie in die Höhe bläst. Es gelingt dies namentlich für die kleinsten und leichtesten von ihnen, die Coniferensamen.

Bei den natürlichen Organen nimmt die Verdickung resp. Beschwerung des Vorderrandes vom Nussende zum

Flügelende allmählich ab, so dass auch bei Verkürzung des Flügels durch Abschneiden die Lage der Hauptträgheitslängsaxe immer die gleiche oder wenigstens nahezu die gleiche bleibt. Stellt man Modelle von ähnlicher, gegen das Flügelende abnehmender Belastung her, so verhalten sie sich ebenso, ist dagegen die Belastung der letzteren eine gleichmässige längs des ganzen Vorderrandes, so wechselt natürlich bei Verkürzung des Flügels die Lage der Längsaxe, wenn dieselbe nicht schon von Anfang parallel dem Vorderrande verlief.

Längliche ebene Platten, welche keine besondere Belastung der Längskante, sondern nur eine Verschiebung des Schwerpunktes durch eine, ausserhalb einer Symmetrieaxe angebrachte Last erhalten, können die charakteristische Bewegung des XII. Typus ebenfalls annehmen, jedoch thun sie dies nicht so leicht, drehen relativ langsamer und in steiler geneigter Stellung, und fallen gerne wieder heraus. Natürliche Organe von solcher Ausbildung (ohne besondere Belastung der Vorderkante) sind mir nicht bekannt geworden.

Der Grund für das geschilderte Verhalten liegt wesentlich in der ungünstigeren Lage der Hauptträgheitslängsaxe, die keine hinreichende Stabilität gegen drehende Kräfte ermöglicht, welche die Vorderkante des Organs nach aufwärts zu drehen streben. Die Hauptträgheitslängsaxe eines solchen Modelles ist zu weit nach rückwärts verschoben, so dass die um diese Axe drehenden Kräfte allzu sehr anzuwachsen vermögen. Überschreitet die erzeugte Drehung einen gewissen Punkt, so werden die um die im Raume vertikale Schwerpunktsaxe drehenden Kräfte zu gering, resp. gleich Null, es entstehen sogar diesen gegensinnig drehende Kräfte. Es sinkt nun die Nuss sofort herab, das Organ fällt aus seiner bereits eingeleiteten Bewegung heraus.

Bei sehr starker Längskrümmung fallen Modelle, welche man in die Höhe wirft und welche bereits in Rotation übergegangen waren, leicht wieder heraus, wogegen richtig konstruirte Modelle, wie die natürlichen Objekte, die grösste Steighöhe drehend passiren und so lange fortdrehen, bis beim Rückfallen neuer Antrieb erzeugt wird. Die aus der Rotation kommenden Modelle fallen erst ein grösseres Stück,

um dann neuerdings zu beginnen. Sehr selten kommen natürliche Objekte dieser Art vor.

Auffallend sind die sehr ausnahmsweise bei Kiefernsamen vorkommenden intermittirend rotirenden Formen. Im Verhältniss zur Länge der Flügel war im einzigen beobachteten Fall die Nuss klein, ebenso war die Belastung der Vorderkante sehr gering. Die Sförmige Flügelkrümmung, welche im übrigen alle Kiefernsamen besitzen, war ungewöhnlich stark ausgesprochen und der Flügel war von unten nach oben etwas rechtsschraubig gedreht. Beim Fall stellte sich der Same zunächst ein wie alle Kiefernsamen, so dass die Konvexität der unteren und die Konkavität der oberen (entgegengesetzten) Krümmung abwärts gerichtet war. In dieser Stellung begann er zu rotiren, um aber sofort nach 1—2 Rotationen herauszufallen. Dann stellte er sich neuerdings ein, fiel wieder heraus u. s. f. Der Grund für solches Verhalten liegt auch hier wesentlich in der zu weit nach rückwärts verschobenen Lage der Hauptträgheitslängsaxe. Die starke schraubig Sförmige Krümmung des Flügels begünstigt dies Verhalten, wie man durch Modelle leicht nachweisen kann.

Man kann sich Modelle, welche das gleiche Verhalten zeigen, aus starkem Schreibpapier und Siegellack darstellen, wenn man ihnen die Form der verlängerten Kiefernsamen gibt und sowohl die End- wie Randbelastung nicht zu stark macht. Macht man den Flügel ganz eben, so geht die Bewegung des Modells leicht in diejenige des IX. Typus über, gibt man ihm aber die geschilderte schwach schraubige Krümmung, so kann man die gleiche Bewegung erzielen wie sie das natürliche Organ zeigte. Solche Formen stellen gewissermassen Zwischentypen zwischen dem XI. und XII. Typus dar.

Aus den Organen des XI. Typus, z. B. den Eschenfrüchten, kann man übrigens sofort durch geringe Belastung einer Längskante mittelst eines Siegellacktröpfchens nach der Weise des XII. Typus funktionirende Körper herstellen. Man thut damit nichts anderes, als man rückt die Hauptträgheitslängsaxe des Körpers näher an eine Längskante. Es wird auf diese Art das nicht uninteressante physikalische

Problem gelöst, einem Körper durch Vergrösserung seines Gewichtes bei gleichbleibender Fläche eine verminderte Fallgeschwindigkeit zu ertheilen.

Um das Verhältniss der Belastungen der Längs- und Queraxe, resp. die Grenze des Verhältnisses, welches die charakteristische Bewegung ermöglicht, annähernd festzustellen, habe ich verschiedene Versuchsreihen angestellt. Um die Sache möglichst einfach zu gestalten, namentlich um die mühsame Berechnung der Trägheitsmomente in Bezug auf die Längsaxe zu umgehen (welche sonst nothwendig ist, wenn man die Lage dieser Axe genau kennen will) habe ich länglich rechteckige, ebene Blätter von gutem, möglichst steifem Schreibpapier angewandt und die Belastung der Vorderkante mittelst gleichbreiter aufgeklebter Kartonstreifchen vorgenommen. Bei sorgfältiger Herstellung erzielt man so eine den beiden Längskanten parallele Lage der Hauptträgheitslängsaxe. Bringt man nun die Belastung der Kurzkante so an, dass der Schwerpunkt des belastenden Körpers (sei letzterer aus Karton- oder Holzscheibchen oder aus Siegellacktropfen hergestellt) auf die vorher mit Bleistift auf der Platte angezeigte Längsaxe trifft, so behält diese ihre Lage bei.

Stellt man sich nun einige solche gleichgestaltete Platten her, bei denen man die verschiedene Lage der Längsaxe fixirt, so kann man die Lage der Queraxe beliebig variiren, indem man mit geringer Belastung einer Kurzkante am äussersten Ende der Längsaxe anfängt und dieselbe allmählich steigert.

Die zu folgenden Versuchen benützten rechtwinkligen Platten massen 30 auf 100 mm und die Belastung der Kurzkante wurde durch allmählich vergrösserte Siegellacktropfen vorgenommen. Absolute Genauigkeit ist natürlich so nicht zu erzielen, indessen genügte dieselbe für den vorliegenden Zweck, welcher nur das prinzipielle Verhalten feststellen sollte. Die möglichen Fehler können entstehen durch seitliche Verschiebung des Schwerpunktes, indess ist eine solche bei einiger Sorgfalt, wie ich mich durch mehrfache genaue Kontrole überzeugt habe, sehr unbedeutend und beeinträchtigt das Endresultat nur in sehr geringem Grade.

Modell-nummer	qFV ausgedrückt durch die Breite in mm	qFV reduzirt	1FV ausgedrückt durch die Länge in mm	1FV reduzirt
1	8 : 22	1 : 2,75	50 : 50	1 : 1
„	8 : 22	1 : 2,75	25 : 75	1 : 3
2	9 : 21	1 : 2,33	50 : 50	1 : 1
„	9 : 21	1 : 2,33	30 : 70	1 : 2,33
3	10 : 20	1 : 2	50 : 50	1 : 1
„	10 : 20	1 : 2	32,3 : 67,7	1 : 2,09
4	11 : 19	1 : 1,73	50 : 50	1 : 1
„	11 : 19	1 : 1,73	34 : 66	1 : 1,94
5	12 : 18	1 : 1,5	50 : 50	1 : 1
„	12 : 18	1 : 1,5	38 : 62	1 : 1,63
6	13 : 17	1 : 1,25	50 : 50	1 : 1

Verhalten

während des Falles.

Wie Typus X. Mit abnehm. 1FV Beweg. zunehm. unregelm.

Beginnt zu funktioniren. Mit abnehm. 1FV Funktion immer besser.

Wie Typus X. Mit abnehm. 1FV Bahn immer enger spiralig und leichter unregelmässig.

Beginnt zu funktioniren. Mit abnehm. 1FV Funktion immer besser.

Wie Typus X. Mit abnehm. 1FV Bahn immer enger spiralig.

Beginnt zu funktioniren. Mit abnehm. 1FV Funktion immer besser.

Wie Typus X. Mit abnehm. 1FV Bahn immer enger spiralig und leichter unregelmässig.

Beginnt zu funktioniren. Mit abnehm. 1FV Funktion immer besser.

Stückweise wie Typus X, stückweise wie Typ. IX, leicht ganz unregelmässig. Mit abnehm. 1FV nimmt diese Unregelmässigkeit noch zu.
Beginnt zu funktioniren. Mit abnehm. 1FV Funktion immer besser.

Wie Typus IX. Mit abnehm. 1FV weniger regelmässig. Auch bei beliebiger Verminderung des 1FV tritt keine Funktion mehr ein.

Einen anderen grösseren Fehler besitzen solche Modelle aus gleichbreiten Platten dadurch, dass sie sich, wenn nicht der Unterschied in der Flächengrösse beiderseits der Queraxe ein sehr bedeutender ist, resp. wenn nicht die Queraxe ganz nahe an die untere Kante heranrückt, bei der Rotation zunehmend schief zum Horizont einstellen, zunehmend grössere Spiralbahnen beschreiben und schliesslich umkippen, gerade so wie es frei fallend rotirende Kreisel thun. Die Gründe dieses Verhaltens fallen mit denen beim Kreisel zusammen, wovon im nächsten Abschnitt eingehend die Rede sein wird. Indessen kam es bei vorliegenden Versuchen hierauf nicht weiter an, da es mir blos darum zu thun war, festzustellen, unter welchen Grenzbedingungen die Bewegung überhaupt zu Stande kommt.

Man kann das Überkippen sofort zum Verschwinden bringen, wenn man die Fläche des „Nusstheiles" und zwar ihr hinter der Längsaxe gelegenes Stück durch Abschneiden entsprechend verkleinert. Die Form nähert sich dann sofort derjenigen der natürlichen Körper. Indessen treten damit andere Schwierigkeiten für die Versuche ein, indem erstens die Lage des Schwerpunktes und damit der Längsaxe etwas verschoben wird und zweitens für jede Lage der Queraxe ein verschieden grosses Stück weggeschnitten werden muss. Hiermit ändert sich aber auch das Flächenverhältniss.

Fallen gelassen wurden die Modelle auf alle möglichen Arten, namentlich in längshorizontaler oder wenig geneigter Lage mit tieferem Flügelende, wobei die leichte Hinterkante senkrecht nach abwärts gerichtet war. Aus letzterer Fallstellung kommen sie am leichtesten und raschesten zur Rotation.

Die Tabelle auf Seite 296 u. 297 gibt die Grösse der Verschiebung des Schwerpunktes resp. der Schwerpunktslängs- und -queraxe an: Erstens derjenigen gegen die belastete Längskante, ausgedrückt durch die Grösse der Flächenvertheilung beiderseits der Längsaxe, resp. durch die Grösse der durch den Schwerpunkt auf der Queraxe abgeschnittenen Stücke, und zweitens derjenigen gegen die belastete Kurzkante. qFV bedeutet das Flächenverhältniss in der Querrichtung, lFV dasjenige in der Längsrichtung. Unter der

letzten Rubrik „Verhalten“ ist die Art der Funktion für die zugehörigen Flächenverhältnisse kurz verzeichnet.

Es ergibt sich aus diesen Versuchen, dass bei festem Flächenverhältniss nach der Querrichtung, das gleiche Verhältniss nach der Längsrichtung die oberste Grenze für die Funktionsmöglichkeit gibt. Unterhalb dieser Grenze kann das Längsverhältniss ein sehr wechselndes sein, soweit die Platte es gestattet. Unterhalb der obengenannten oberen Grenze des Längsverhältnisses kann das Querverhältniss ebenfalls wechseln. Die Abweichungen der obersten Grenzverhältnisse von einander sind relativ gering, und es ist dabei zu beachten, dass das die Funktion begrenzende oberste Längenverhältniss im Falle der Abweichung immer unter das Querverhältniss herabsinkt, nie oberhalb desselben bleibt. Es zeigt dies, dass die Abweichungen nur auf Versuchsfehlern beruhen.

d. Die Spiralbahn.

Es bleibt uns noch übrig, eine sehr auffällige Begleiterscheinung bei der Bewegung dieser Organe zu untersuchen.

Wie schon gesagt, bewegen sich die rotirenden Organe, ebenso wie die Modelle, häufig nicht ganz lothrecht zum Boden. Freilich ist die Abweichung von der lothrechten oft nur eine höchst geringe. In anderen Fällen aber ist sie sehr bedeutend und es ergibt sich bei genauerer Beobachtung, dass sie immer deutlich spiralig ist und in umgekehrter Richtung wie die Rotation verläuft. Nennen wir die Bewegung des Uhrenzeigers eine rechtsläufige und betrachten wir die beiden Bewegungen beim Fallen der Organe von oben herab, so geht mit Rechtsrotation immer und ausnahmslos linksläufige Spiralbahn einher, ebenso wie mit Linksrotation rechtsläufige Spiralbahn. Bei mannigfaltigen bezüglichen Versuchen liess sich nun feststellen, dass gewisse Organe und Modelle leichter eine Spiralbahn beschreiben als andere.

Sehr leicht thun es vor allem gut konstruirte flachflügelige Körper, welche sehr rasch und in fast ganz horizontaler Stellung rotiren. Weniger leicht thun es Modelle oder Samen, welche nach dem Muster des Fichtensamens gebaut sind, mit stärkerer Wölbung des Flügels, überhaupt

alle die, welche sich beim Rotiren nicht horizontal sondern etwas mehr längs geneigt stellen.

Ohne Ausnahme und in intensivem Masse thun es aber alle rascher rotirenden Organe und Modelle, wenn sie während der Rotation in schiefe Lage zum Horizont gerathen. Wenn man z. B. ein Modell mit kräftiger Armbewegung in mehr oder weniger wagrechter Richtung wirft, wobei es mit fast senkrecht stehender Längsaxe um seine sich wagrechtstellende Vertikalaxe des Körpers zu rotiren beginnt. Es beschreibt dann, indem es zuerst eine S förmig gekrümmte Kurve macht eine weitgezogene Spirale. Diese wird bei fortgesetzter Fallbewegung allmählig enger und die Rotationslage wird immer mehr horizontal.

Aehnlich wirkt bewegte Luft, nur erweitert sich hier, wenn, wie im Freien der Luftzug andauert, die Spirale. Im Allgemeinen aber behält der rotirende Apparat seine einmal angenommene Neigung bis zu gewissem Grade bei und stellt sich erst nach und nach wieder mehr horizontal. Die Neigung der Rotationsaxe ist dabei ausnahmslos nach aussen gerichtet und die letztere beschreibt um die ideale Bahnaxe einen umgekehrten Kegelmantel. Dieses Verhalten führt auf den Vergleich mit der Bewegung des Kreisels, dessen Axe, wenn sie durch irgend eine Ursache sich einmal geneigt hat, dauernd ihre Neigung beibehält, wobei aber die Richtung der Neigung sich fortdauernd verändert. Nur bewegt sich hier die fortschreitende Neigung der Axe mit der Rotationsrichtung gleichsinnig.

Zur Prüfung der Sache stellte ich mir zunächst aus dünnem aber festem Karton einen flachen Kreisel von 5 cm Halbmesser her und versah ihn mit einer materiellen Axe aus einem dünnen unten zugespitzten Holzstäbchen, welches mittelst Siegellack möglichst genau im Zentrum befestigt wurde.

Ein solcher Apparat besitzt ein ziemlich ansehnliches Trägheitsmoment seiner mit der Richtung seiner materiellen Axe zusammenfallenden, zur Fläche senkrechten Schwerpunktsaxe. Es ist diese nach Poinsots Rotations-Theorie die kleinste Axe des zentralen Trägheitsellipsoides des Kreisels, und in Folge der sehr bedeutenden Abweichung von allen

andern darauf senkrecht stehenden Trägheits-Axen, welche in Folge der kreisrunden Form der Scheibe einander gleich sind, die einzige stabile Hauptträgheitsaxe. Ein solcher Kreisel funktionirt in Folge dessen, wenn ihm durch Drehung eines freien Axenendes zwischen Daumen und Zeigefinger eine kräftige Rotationsbewegung ertheilt ist, ganz vortrefflich. Dabei zeigt er auf einer erhöhten und nicht zu breiten, glatten und etwas vertieften Unterlage (welche man sich leicht aus Siegellack herstellt) wo er ohne anzustossen, sich seitwärts neigen kann, jene bekannten Erscheinungen der Axenneigung, wie sie Euler*) zuerst untersuchte.

Man kann den Neigungsvorgang am schönsten beobachten, wenn man auf einen randständigen Punkt der horizontal rotirenden Scheibe mittelst eines dünnen Glasrohres in senkrechter Richtung von oben herab nicht zu stark bläst. Es neigt sich in solchem Fall die Scheibe und damit auch die Axe um eine horizontale Queraxe, aber nicht um diejenige, welche senkrecht steht zu der, Resultante und Schwerpunkt aufnehmenden Angriffsebene, wie man zunächst erwarten sollte, sondern um eine zu dieser Axe senkrechte horizontale Axe: nämlich um die Queraxe, welcher der Angriffspunkt der Resultante selbst angehört.

Also die Neigung erfolgt in einer Richtung, die um 90^0 absteht von der, in welcher der Angriff statt hatte. Bei Rechtsrotation neigt sich Scheibe und Axe nach links, bei Linksrotation aber rechts. Diese Neigung erhält sich dann dauernd oder nimmt vielmehr langsam zu, schreitet aber dabei vorwärts und zwar immer im nämlichen Sinne, wie die Rotation selbst vor sich geht.

Eine sehr einfache, gemeinverständliche Erklärung des Vorganges gab bekanntlich Poggendorf. Er zeigte nämlich, dass an den Enden der Queraxe, um welche eine Kraft den Kreisel zu drehen strebt (in der Figur 5 Taf. VIII bei g und h, z. B., wenn die Kraft bei k als abwärts wirkender Druck oder Zug sich geltend macht) die tangentialen Geschwindigkeiten der Scheibe aus ihrer Ebene heraus zu treten streben

*) „Leonhard Eulers Mechanik" herausgeg. v. Wolfers III. 1853 p. 408 u. f.

und dass dadurch eine bei g senkrecht nach abwärts, bei h ebenso nach aufwärts gerichtete Komponente der Zentrifugalkraft zur Wirkung komme. Diese beiden Komponenten wirken aber gleichsinnig und bewirken eine Drehung um die andere senkrecht dazu gerichtete Queraxe (ik) der Scheibe.

Hier wiederholt sich derselbe Fall, indem nun die Schwere den Punkt g (richtiger natürlich den Schwerpunkt) nach abwärts zieht und eine Drehung um die Axe ik zu bewirken strebt. Bei solcher Drehung kommen aber bei i und k je eine abwärts und aufwärts gerichtete Componente der Geschwindigkeit zur Wirkung, die sich wiederum gegenseitig verstärken und nunmehr eine Neigung in der Richtung gegen i bewirken. So setzt sich der Vorgang fort, indem die Neigung der Axe A gleichsinnig mit der Rotationsrichtung herumläuft, immer um 90^0 dem Angriffspunkt des abwärts gerichteten Zuges voraus. An der sich neigenden Partie der Scheibe findet immer nur eine Parallelverschiebung der Geschwindigkeiten statt, welche selbst keinen störenden Einfluss übt.

Nach dem mechanischen Lehrsatze vom Parallelogramm der Rotationen lässt sich aus der Richtung und der Winkelgeschwindigkeit zweier unendlich kleiner sich verbindender Rotationen um zwei sich in einem Punkte schneidende Axen eines Körpers die Richtung der resultirenden Axe und die Winkelgeschwindigkeit der resultirenden, unendlich kleinen Rotation berechnen. Man erhält die resultirende Axe durch die Diagonale eines Parallelogramms, dessen Seiten den betreffenden Amplituden proportionale, auf den Axen von ihrem Schnittpunkte aus aufgetragene Strecken sind, und zwar werden die Strecken in der Richtung aufgetragen, in der von ihrem Schnittpunkte aus gesehen, die beiden Rotationen gleichsinnig erscheinen. Die Amplitude der resultirenden Rotation ist der Länge der Diagonale proportional und letztere zeigt gleichzeitig die resultirende Axenlage an.

Denken wir uns in Fig. 5 Taf. VIII wiederum dieselbe Verbindung zweier Rotationen um die Axen AB und gh, so erscheinen uns diese beiden Rotationen gleichsinnig, wenn wir uns in den Punkt S hineindenken und nun in der Richtung g und A sehen. Sie erscheinen beide von rechts über

oben nach links vor sich gehend, also nach der gewöhnlichen Terminologie links rotirend. (In der Richtung des entgegengesetzten Quadranten hSB der die beiden Axen aufnehmenden Ebene würden sie auch gleichsinnig, aber hier rechts rotirend erscheinen.) Im Quadranten ASg muss somit die resultirende Axe der beiden komponenten Einzeldrehungen liegen.

Seien die betreffenden Winkelgeschwindigkeiten beispielsweise gleich Sm und Sl, so erhalten wir in SA' die resultirende Momentanaxe, um welche nun der Kreisel und somit auch die beiden zusammensetzenden Axen, Kegelmäntel beschreibend, rotiren. Nach den Gesetzen der Rotation freier Körper wird aber jede Drehung eines Körpers, welche nicht um eine seiner Hauptträgheitsaxen vor sich geht, allmählig in eine solche übergeführt, und zwar in eine Rotation um eine beharrliche Hauptträgheitsaxe. Diese ist hier die mit der materiellen zusammenfallende Körperaxe AB. Dieselbe bewegt sich in Folge dessen, indem sie die Momentanaxe SA' in einer immer enger werdenden Curve umkreist, dieser zu und fällt schliesslich so gut wie ganz mit ihr zusammen, wobei die ursprüngliche Geschwindigkeit der Rotation um die Axe AB, da sie unverhältnissmässig viel rascher vor sich geht, als die um die Queraxe, so gut wie keine Veränderung erfährt. So gering der seitliche Ausschlag anfangs ist, so steigert sich doch durch die fortgesetzte Einwirkung der Effekt, und es entsteht die starke Neigung, welche gleichsinnig mit der Rotation weiter verläuft.

Hier ergibt sich nun aber ein scheinbar sehr wesentlicher Unterschied im Verhalten des Kreisels mit demjenigen der geflügelten Rotationsorgane. Die Neigung der Axe beim Kreisel schreitet gerade im umgekehrten Sinne fort, wie bei jenem. Es konnte dies nach einiger Ueberlegung nur in der Unterstützung des einen und dem freien Fall des andern begründet sein. Ich machte daher Fallversuche mit dem rotirenden Kreisel und hier stellte sich auch sofort heraus, dass bei freiem Fall desselben ebenfalls die Axenneigung entgegengesetzt wie die Rotation fortschreitet. Lässt man den Kreisel rechts rotirend fallen, so verhält er sich genau wie die geflügelten Rotationsorgane, d. h. er fällt senkrecht

oder nahezu senkrecht zu Boden, wenn die Scheibe ganz horizontal rotirt. Bei bedeutenderer Fallhöhe fängt er im unteren Theil seiner Bahn an, spiralige Exkursionen um die lothrechte zu machen. Lässt man ihn mit geneigter Rotationsaxe, also auch geneigter rotirender Scheibe fallen, so beschreibt er weite spiralige Umgänge, welche der Richtung der Rotation entgegengesetzt verlaufen. Bei Rechtsrotation ist die Spirale links, bei Linksrotation rechts gedreht, dabei schreitet die Neigung der Rotations-Axe des Kreisels, welche immer nach der äusseren Seite der Bahn gerichtet ist, in demselben Mass und Sinn wie die Spirale vor.

Betrachten wir zunächst den mechanischen Vorgang beim freien Fall des rotirenden Kreisels. Bei ganz horizontaler Rotation der Scheibe ist häufig anfangs keine oder nur höchst schwach spiralige Bewegung zu beobachten. Der Kreisel fällt ziemlich lothrecht zu Boden. Wirkt aber der Luftwiderstand auf die untere Fläche des Kreisels ungleich ein in Folge gleich anfänglich gegebener oder erst später erlangter Neigung (nach dem Prinzip des gehemmten Luftabflusses an der tiefsten Stelle der vom Luftstrom getroffenen schiefen Unterfläche), indem er auf die tieferen Theile der Scheibe stärker drückt, so bewirkt dieser Druck eine Aufwärtsdrehung der Scheibe um die zur Angriffsrichtung senkrechte Queraxe.

Während beim unterstützten Kreisel die Schwerkraft sofort auf den wie immer aus seinem labilen Gleichgewicht herausgeführten Schwerpunkt wirkt und diesen in der Neigungsrichtung noch tiefer nach abwärts zu ziehen sucht, wird dieser hier ebenso wirkende Einfluss der Schwere durch die aufwärts wirkende Luftwiderstandsresultante, welche unterhalb des Schwerpunktes angreift, kompensirt und eine aufwärts drehende Wirkung auf die untere Parthie der Scheibe erzeugt. Dieselbe strebt, wenn k (Fig. 6 Taf. VIII) der tiefste Punkt einer geneigten rotirenden Scheibe wäre, oder was ähnlich ist, wenn auf den Punkt k der horizontalen rotirenden Scheibe eine in der Richtung des Pfeiles von unten nach oben gerichtete drehende Kraft einwirkte, diesen Punkt k um die Axe gh nach aufwärts zu drehen, also eine gerade

umgekehrte Wirkung auszuüben wie die beim unterstützten Kreisel allein zur Wirkung kommende Schwerkraft.

Bei Rechtsrotation der Scheibe um ihre Axe A B verlaufen die beiden Rotationsbewegungen in der Richtung von S aus gegen h und gegen A gesehen gleichsinnig. Die resultirende Momentanaxe wird somit in der Ebene zwischen A und h liegen und wenn S l und S m die Grössen der betreffenden Winkelgeschwindigkeiten darstellen, in der Richtung S A'. Die Länge der Diagonale S A' entspricht der Grösse der resultirenden Winkelgeschwindigkeit. Mit der Neigung der Axe A nach rechts würde aber nun der Punkt h der tiefste der Scheibe. Der Luftwiderstand sucht in Folge dessen eine Drehung um die Queraxe i k zu bewirken und die Folge dieser Drehung ist die nunmehrige Neigung der Axe A in der Richtung nach i um die Queraxe gh.

So schreitet hier also umgekehrt wie beim unterstützten Kreisel die Neigung der Axe bei Rechtsrotation nach links fort. Hiemit sind die Gründe für die Neigung der Axe und damit auch diejenigen für die spiralige Bahn klar. Denn der Kreisel gleitet in Folge seiner Schiefstellung nach bekannten Gesetzen gewissermassen wie auf schiefer Ebene immer ein Stück weit nach der Seite seiner grössten Neigung abwärts, genau wie jedes flache Stück Papier, das wir in schiefer Lage fallen lassen.

Ebenso verhält es sich mit den rasch rotirenden Flügelsamen und Früchten. Dieselben sind im Prinzip überhaupt nichts anderes als frei in der Luft rotirende und von ihr getriebene Kreisel, wie aus dem bisher gesagten schon ganz zweifellos hervorgeht. Dennoch bedarf die Sache, um diesen Vergleich zu rechtfertigen, noch einer ins Einzelne gehenden Betrachtung, denn die geflügelten Rotationsorgane sind ja gewissermassen doch nur Kreiselausschnitte, wenn man so sagen darf, mit dem mitherausgeschnittenen Mittelpunkte, d. h. Schwerpunkte, welchem, um ihm diese Funktion zu belassen, ein sehr bedeutendes Gegengewicht in Gestalt der Nuss auf der anderen Seite angehängt ist. Die Sache verhält sich im Einzelnen eben bedeutend verwickelter, wenn auch der Gesammteffekt ein ähnlicher ist.

Stehen die Rotationsebenen der einzelnen Punkte eines

solchen rotirenden Systems horizontal, so wird der Angriffspunkt des senkrecht nach aufwärts gerichteten Luftwiderstandes seinen Ort in jeder Lage während einer Umdrehung beibehalten, wie Fig. 7 Taf. VIII durch die Pfeile angedeutet ist. Die Drücke müssen sich somit gegenseitig kompensiren, da sie einander gegensinnig und gleich gross sind, mit anderen Worten: die Resultirende aus allen Drücken während eines Umganges muss durch den Schwerpunkt gehen. Etwaige Änderungen beim Beginn der Bewegung, sowie bei den Oszillationen gehen wenigstens so gleichmässig vor sich und finden gleichzeitig für jede Stellung während einer Umdrehung so vollkommen gleichsinnig — resp. gegensinnig — statt, dass auch hier vollkommene Kompensation eintritt.

Anders aber ist es, wenn die Rotationsebene eine schiefwinkelige Stellung zum Luftwiderstande einnimmt. Hier kompensiren sich die einzelnen Drücke in den verschiedenen Lagen während einer Umdrehung nicht mehr.

AB und CD Fig. 8 Taf. VIII seien vertikale Längsdurchschnitte zweier in 180^0 Abstand von einander eingenommener Stellungen während eines Umganges, und zwar für einen seitlich stehenden Beobachter, dessen Auge sich in gleicher Höhe mit dem Schwerpunkte s des rotirenden Organs befindet. Die Punkte B und D zeigen die höchste und tiefste Stellung des oberen Flügelendes während einer Umdrehung und eine sie verbindende Linie gibt somit die Grösse des Flächenwinkels an, welchen die Rotationsebene des Organs (richtiger die Rotationsebenen aller einzelnen Punkte desselben) mit dem Horizont einschliesst.

In der Stellung CD sehen wir hier nun den Angriffspunkt a der Resultirenden des momentan wirkenden Luftwiderstandes auf die entgegengesetzte Seite von m verschoben, wie in der Figur 7. Es findet diese Verschiebung nach dem Prinzip des erschwerten Luftwiderstandes statt und das Moment der Kraft p ist hier gleich $p \cdot r s$. In der entgegengesetzten Stellung AB befindet sich der Angriffspunkt a der Resultirenden p auf derselben Seite von m wie in der Fig. 7, indess auch hier, da die Neigung zwar gleichsinnig aber stärker ist, dem gleichen Prinzip wie vorhin entsprechend, etwas nach abwärts verschoben. Der Hebelarm ts des Mo-

mentes $p_1 \cdot ts$ ist somit ein kürzerer, als der Hebelarm rs in der Stellung CD. Die beiden Momente kompensiren sich hier nicht mehr, sondern das letztere überwiegt bei weitem und strebt der Momentaxe y eine Drehung in der Papierebene und zwar in der Richtung der beiden Pfeile zu ertheilen, mit anderen Worten, sie senkrecht zu stellen.

Wenn wir ebenso alle anderen je um 180° von einander entfernten Stellungen während einer Umdrehung in Bezug auf die Lage des Angriffspunktes einzeln untersuchen, so stellt sich heraus, dass alle anders drehenden Momente einander kompensiren und dass nur ein resultirendes Gesammtmoment übrig bleibt, welches in der nämlichen Drehungsebene, wie bei den Stellungen AB und CD zu drehen sucht. Dasselbe besitzt die Grösse der algebraischen Summe aller in gleicher und entgegengesetzter Richtung wirksamen statischen Momente und dreht um eine im Raume horizontale, im Körper beständig seine Richtung ändernde Schwerpunktsaxe, welche in einer der Figur entsprechenden Stellung senkrecht zur Papierebene verläuft.

Die Wirkung dieser Drehung bei gleichzeitiger Rechtsrotation macht sich nun aber durch eine Neigung nicht in der Angriffsebene der Resultante und des Schwerpunktes, sondern in einer zu dieser senkrechten Ebene, und zwar um 90° nach rechts von der ersteren, geltend, ganz wie wir das beim Kreisel gesehen haben. Die Axenneigung schreitet dann gegenläufig zur Rotationsrichtung weiter.

Der geflügelte Rotationsapparat verhält sich also wirklich ähnlich wie der frei fallende und rotirende Kreisel.

In dem Gesammtverhalten stimmen beide Apparate, abgesehen davon, dass die geflügelten Organe erst durch die Luft in Rotation gesetzt werden und einen sich selbst einstellenden Schrauben- oder Windmühlenflügel vorstellen, bis zu einem gewissen Grade überein. Gerade dieser Unterschied macht aber den Vorgang bei den letzteren zu einem viel komplizirteren, da durch die kolossale Exzentrität der Konstruktion, welche die Bedingungen für den drehenden Luftangriff bietet, bei Schieflage der Axe ein

bei jeder Rotationsstellung wechselnder Angriffspunkt des Luftwiderstandes hinzukommt.

Im Übrigen ist ein weiterer wesentlicher Unterschied im Verhalten, obschon er uns im Grunde weiter nicht mehr berührt, wenigstens zu erwähnen.

Während die rotirenden Flügelfrüchte und ihre Modelle sich allmählig wiederum horizontal stellen, neigt sich der in geneigter Lage rotirende fallende Kreisel immer mehr und stürzt schliesslich um. Der Grund für letzteres Verhalten liegt darin, dass ununterbrochene gleichsinnige Aufwärtsdrehung stattfindet. Der Angriffspunkt des Luftwiderstandes während einer ganzen Umdrehung bleibt dauernd derselbe und seine Drehwirkung bleibt sich ebenso dauernd gleichsinnig, so dass das statische Gesammtmoment ein sehr bedeutendes wird und die gegensinnig rotirende Neigung sich fortwährend verstärken muss.

Bei den rotirenden Flugorganen dagegen ist das gesammtresultirende Moment der aufwärts drehenden resp. die Axe seitwärts neigenden Kräfte während einer Umdrehung nicht gross genug, eine so starke Neigung zu erzielen, dass der Winkel der Rotationsebene mit dem Horizont der gleiche bleibt oder gar zunimmt. Die betreffenden nicht kompensirten Kräfte kommen eben, wie schon bemerkt, nur während einer halben Umdrehung überhaupt zur Entstehung, nämlich von einer horizontalen Stellung der Längsaxe bis zur entgegengesetzten, 180^0 davon entfernten. Sie wirken nur in dem Abschnitt, während dessen der Flügel nach abwärts gerichtet ist und nehmen dabei von der Stellung, wie sie Fig. 8 andeutet, nach beiden Seiten zu ab bis sie 90^0 von ihr gleich Null werden. In der andern Umdrehungshälfte werden die drehenden Kräfte überhaupt gegensinnig, nur sind die wirksamen Hebelarme der Drücke etwas kürzer.

Man kann, wie im vorhergehenden Abschnitt erwähnt wurde, rotirende Modelle herstellen, welche sich darin ebenso, wie der Kreisel verhalten. Man braucht zu diesem Zwecke nur länglich rechteckige Platten anzuwenden. Bei richtiger, nach zwei Richtungen verschobener Lage des Schwerpunktes und entsprechender Lage der Hauptträgheitslängsaxe beginnen solche Systeme ganz regelrecht unter beschleunigter

Rotation sich horizontal zu stellen. Dieselben erhalten sich jedoch nicht in horizontaler Lage, sondern stellen, wie der Kreisel, unter Erzeugung einer gegensinnigen, spiraligen, sich erweiternden Schwerpunktsbahn ihre Rotationsebene zunehmend schiefer zum Horizont bis sie endlich umkippen.

Die Ursache für dies Verhalten ist im Grunde ganz die gleiche wie beim Kreisel. Solche gleichbreite Platten stellen, wenn der Schwerpunkt nicht ganz nahe an die untere Kurzkante verschoben ist, wo sich die Apparate dann wie die natürlichen Organe verhalten, grössere Kreiselausschnitte dar, bei denen die Erzeugung gleichsinnig drehender nicht mehr kompensirter Kräfte während eines grösseren Abschnittes einer Umdrehung andauert. Das statische Gesammtmoment während einer Umdrehung wird daher wie beim Kreisel bereits so gross, dass der Neigungswinkel der Rotationsebene zum Horizont zunimmt.

Uebrigens wird der Kreisel sofort umgestürzt, wenn die Rotation um die Vertikalaxe zu langsam wird, was in Folge der Reibung ziemlich rasch eintritt. Die Kraft zur Erhaltung der Rotationsebene erlischt dann allmählig und es tritt das gleiche Verhalten ein, wie es der Typus der flach scheibenförmigen Organe uns kennen lehrte.

Bei den zuletzt genannten Modellen beschleunigt sich dieser Vorgang ebenfalls um so mehr, je geringer der Flächenunterschied beiderseits der Queraxe ist, also je mehr sich die Verhältnisse denen beim Kreisel selbst nähern, indem dann ebenfalls mit der zunehmenden Einstellung der Fläche in die Rotationsebene Verminderung der Rotationsgeschwindigkeit eintritt.

Rückblick.

Der nächste Grund der charakteristischen Bewegung länglicher Platten mit nach zwei Richtungen verschobenem Schwerpunkt ist der Mangel einer Gleichgewichtslage während des Falles. Während sich die Platten in Bezug auf ihre im Raume horizontalen Schwerpunktsaxen ins Gleichgewicht zu stellen suchen, überwiegt das statische Moment

der horizontalen Druckkomponenten auf die längere Hälfte der Platte so bedeutend, dass dieselben in beschleunigte Horizontalrotation gerathen. Durch diese Horizontaldrehung in nach zwei Richtungen geneigter Lage entstehen senkrecht nach abwärts gerichtete Komponenten des der Rotation entgegenwirkenden Luftwiderstandes, deren statische Momente mit der dritten Potenz des wirksamen Hebelarmes der getroffenen Flächentheilchen wachsen und sehr bedeutende, das längere Ende nach abwärts drehende Kräfte erzeugen. Diese überwinden die nur mit der ersten Potenz ihres Hebelarmes wirksamen statischen Momente des senkrecht aufwärts gerichteten Luftwiderstandes, welcher das leichtere Ende aufwärts zu drehen strebt. In der, horizontaler Lage sich nähernden Stellung macht sich sodann auch die Zentrifugalkraft als in dem ersteren Sinne wirksam geltend, indem die Rotationsaxe dann nahezu mit der Vertikalaxe der Platten, welche eine stabile Hauptträgheitsaxe darstellt, zusammenfällt. Vollkommenes Gleichgewicht der verschiedenen wirksamen Kräfte wird indess nicht erreicht, sondern nur ein relatives, welches durch Oszillationen nach beiden Richtungen fortwährend überschritten wird. Die Oszillationen um die Längsaxe gestatten nach demselben Prinzip, wie bei den Organen des X. Typus eine bedeutend erhöhte Ausnützung des senkrechten Luftwiderstandes, indem sich die Organe zeitweilig mit höher gestellter Vorderkante durch die ihnen innewohnende lebendige Kraft der Drehung in die Höhe schrauben. Die nicht selten zu beobachtenden, der Rotationsrichtung gegensinnigen Spiralbahnen beruhen auf Axenneigungen, welche in Folge zufälliger Schiefstellung rotirender Organe zum Luftwiderstande durch die Kraft der Erhaltung der Rotationsebene, wie beim Kreisel entstehen. Die Platten gleiten dabei immer nach der Seite der jeweiligen Neigung wie auf schiefer Ebene ein Stück weit abwärts.

Zusätze zum XII. Haupttypus.

1. Das Seite 249—251 besprochene, berechnete Modell (Fig. 1, a u. b Taf. VIII) bestand aus folgenden 3 Stücken: 1. Einer in zwei Halbkugeln zerlegten Holzkugel von 11,2 m Radius. Dieselbe mass

5885 cmm und wog 4,921 grm, 1 cmm wog somit 0,83619 mgm. 2. Einer rechteckigen Flügelplatte aus gutem Schreibpapier, von 100 mm Länge und 50 mm Breite. Dieselbe mass 5000 qmm und wog 0,518 grm, 1 qmm wog somit 0,1036 mgm. 3. Einem Versteifungs- resp. Belastungsstreifen aus Karton. Derselbe war 4 mm breit und 100 mm lang, mass somit 400 qmm und wog 0,329 grm, also 1 qmm wog 0,822 mgm. Derselbe bestand aus 2 Streifen von halber Dicke, welche beiderseits der Platte längs des einen Längsrandes fest aufgeklebt waren und so gewissermassen nur einen Streifen, resp. eine verlängerte Platte darstellten. Das Klebemittel (Gummi) ist in dem Gewicht bereits inbegriffen.

Die Hauptträgheitslängsaxe der Platte mit Belastung (ohne Nuss resp. Kugel) verlief genau parallel mit den Längskanten und zwar befand sich dieselbe 16 mm vom belasteten und 34 mm vom leichten Rande. Die beiden Halbkugeln wurden nun beiderseits der Flügelplatte einander gegenüber so aufgeklebt, dass der Schwerpunkt der ganzen Kugel genau auf das eine Ende der Hauptträgheitslängsaxe der belasteten Platte traf, resp. die Kurzkante der Platte fiel genau mit einem Kugeldurchmesser zusammen und die Verlängerung der Hauptträgheitslängsaxe bildete ebenfalls einen Kugeldurchmesser. Auf diesem Wege gelang es, die Lage der Hauptträgheitslängsaxe auch für das ganze Modell zu erhalten.

Der Schwerpunkt des fertigen Modelles lag 7 mm vom Schwerpunkt der Kugel, resp. von der unteren Kurzkante und da die Lage der Hauptträgheitslängsaxe nicht verrückt worden war, so war damit die genaue Lage der 3 Hauptträgheitsaxen gegeben.

Es wurden nun die Trägheitsmomente der einzelnen Stücke in Bezug auf die 3 Axen berechnet und zwar in Gewichtseinheiten. Für die Kugel ergibt sich dann, wenn P das Gewicht, r den Radius, ϱ die Entfernung des Schwerpunktes der Kugel vom Schwerpunkt des Modelles, T_z, T_y und T_x die Trägheitsmomente in Bezug auf die z-, y- und x-Axe bedeuten, folgendes Resultat:

$$T_z = \frac{2}{5} Pr^2 = \frac{2 \cdot 4921 \cdot 11{,}2^2}{5} = 246916;$$

$$T_y = \frac{2}{5} Pr^2 + P\varrho^2 = \left(\frac{2 \cdot 11{,}2^2 + 5 \cdot 7^2}{5}\right) 4921 = 488045;$$

$$T_x = \text{„} = \text{„} = 488045.$$

Für die Flügelplatte ohne Belastung ergeben sich die Trägheitsmomente für die z-Axe aus folgender Rechnung, in der γ das Gewicht der Flächeneinheit der Platte, b ihre Dimension in der Richtung der z-Axe und h_1 und h_2 die zu dieser Axe senkrechten Dimensionen der beiden durch sie abgeschnittenen Plattenstücke bedeuten:

$$T_z = \frac{\gamma b h_1^3}{3} + \frac{\gamma b h_2^3}{3} = \frac{0{,}1036 \cdot 100}{3} (34^3 + 16^3) = 149873;$$

für die x-Axe ergibt sich bei gleicher Bedeutung der Buchstaben nach der gleichen Formel

$$T_x = \frac{0{,}1036 \cdot 50}{3} (93^3 + 7^3) = 1389448;$$

für die y-Axe ergibt sich durch die Berechnung der 4 Rechtecke, in welche die x- und z-Axe die Platte zerlegen, wenn h_1 und h_2 die Dimensionen der Theilstücke in der Längsrichtung (= 93 und 7 mm) und b_1 und b_2 ihre Dimensionen in der Querrichtung (= 16 und 34 mm) der Gesammtplatte bedeuten, und wenn ferner P_1 bis P_4 (= 154,15; 109,19; 11,6 und 24,65 mgm) die jeweiligen Gewichte der 4 Theilstücke bezeichnen:

$$T_y = P_1\left(\frac{h_1^2 + (2b_1)^2}{12} + \left(\frac{h_1}{2}\right)^2\right) + P_2\left(\frac{h_1^2 + (2b_2)^2}{12} + \left(\frac{h_1}{2}\right)^2\right)$$

$$+ P_3\left(\frac{h_2^2 + (2b_1)^2}{12} + \left(\frac{h_2}{2}\right)^2\right) + P_4\left(\frac{h_2^2 + (2b_2)^2}{12} + \left(\frac{h_2}{2}\right)^2\right) = 1539277.$$

Für den Belastungsstreifen bekommen wir, wenn P wieder das Gesammtgewicht desselben, h die Dimension senkrecht zur z-Axe und ϱ die Entfernung seines Schwerpunktes von der z-Axe bedeutet;

$$T_z = P\frac{h^2}{12} + P\varrho^2 = 329\left(\frac{4^2}{12} + 14^2\right) = 64911;$$

wenn wir den Streifen in seine zwei durch die x-Axe getrennten Stücke zerlegen und die Bedeutung der Buchstaben für jedes Stück beibehalten, so bekommen wir

$$T_x = P\left(\frac{h_1^2 + h_2^2}{3}\right) = 329\left(\frac{93^2 + 7^2}{3}\right) = 881905;$$

das Trägheitsmoment in Bezug auf die Vertikalaxe lässt sich am einfachsten berechnen, wenn wir die beiden, durch die x-Axe getheilten Stücke gesondert betrachten. Das Trägheitsmoment eines solchen ist dann gleich der halben Differenz desjenigen zweier Kartonplatten, von denen die eine die Höhe ($h_1 = 93$ mm) des entsprechenden Stückes besitzt, während ihre Breite ($b_1 = 32$ mm) gleich ist der doppelten Entfernung ihres äusseren Längsrandes von der Längsaxe. Die andere Platte, deren Schwerpunkt mit dem der ersteren zusammenfällt, besitzt die gleiche Höhe, ist aber beiderseits um die Breite des Belastungsstreifens schmäler (ihre Breite b_2 beträgt somit nur 24 mm).

Ganz ebenso wird das andere Stück berechnet, nur, dass hier die Höhe der beiden Platten ($h_2 = 7$ mm) eine andere ist, wogegen die Breiten ja dieselben bleiben wie vorhin (für die erste Platte nämlich $b_1 = 32$ mm und für die zweite $b_2 = 24$ mm). Nennen wir das Gewicht der beiden erstgenannten Platten P_1 und P_2, so haben wir dafür $P_1 = h_1 b_1 p$ (worin p das Gew. der Flächeneinh. bedeutet) = 2446,27 mgm, und $P_2 = h_1 b_2 p = 1834{,}7$ mgm. Für das Gewicht der beiden letztgenannten bekommen wir ebenso: $P_3 = h_2 b_1 p = 184{,}12$ mgm und $P_4 = h_2 b_2 p = 137{,}09$ mgm.

Das gesammte Trägheitsmoment der Belastungsplatte in Bezug auf die y-Axe ergibt sich dann aus der Gleichung

$$T_y = \frac{\left(\frac{P_1}{12}(h_1^2 + b_1^2) + P_1\left(\frac{h_1}{2}\right)^2\right) - \left(\frac{P_2}{12}(h_1^2 + b_2^2) + P_2\left(\frac{h_1}{2}\right)^2\right)}{2} +$$

$$+ \frac{\left(\frac{P_3}{12}(h_2^2 + b_1^2) + P_3\left(\frac{h_2}{2}\right)^2\right) - \left(\frac{P_4}{12}(h_2^2 + b_2^2) + P_4\left(\frac{h_2}{2}\right)^2\right)}{2}$$

zu

$T_y = 1077100$.

Durch Addition der Trägheitsmomente aller einzelnen Stücke in Bezug auf die jeweilige Axe erhält man schliesslich die Gesammtträgheitsmomente des ganzen Modells in Bezug auf die betreffende Axe. Bedeuten T_x, T_y und T_z nunmehr diese Trägheitsmomente, so bekommen wir die im Text bereits angeführten Zahlen:

$T_x = 488045 + 1389448 + 881905 = 2759398$ mgm . mm²

$T_y = 488045 + 1539277 + 1077100 = 3104422$ mgm . mm²

$T_z = 246916 + 149873 + 64911 = 461700$ mgm . mm²

(Vgl. hiezu Ritter „Lehrbuch der technischen Mechanik p. 414—424).

Zu dem Modell Fig. 1c Taf. VIII, dessen Trägheitsmomente ebenfalls berechnet wurden, ist folgendes zu bemerken: die gleichbreite Versteifungsplatte des Flügels, an welche sich durch ein kurzes Verbindungsstück von gleicher Breite unten eine Kreisscheibe ansetzte (auf welcher beiderseits die die Nuss darstellenden hölzernen Halbkugeln angeklebt wurden), bestand aus $^5/_{12}$ mm dickem bestem weissem Karton, von dem 1 qmm 0,406 mgm wog. Das ganze war sehr sorgfältig mit der Scheere aus einem Stück ausgeschnitten. Die Länge der 7 mm breiten Platte betrug vom Schwerpunkt an nach aufwärts 117,5 mm.

Das unterste kleine Stück derselben, welches den Flügel mit der Kreisscheibe verband, stellte eine nahezu trapezartige Fläche dar, deren beide parallelen Seiten 1,25 und 6 mm lang waren. Dieses Verbindungsstück wurde der bedeutenden Erleichterung der Berechnung halber als ein gleichschenkelig rechtwinkeliges Dreieck von 6 mm Kathetenlänge berechnet. Der damit gemachte Fehler ist aber bei dem geringen Radius der Massentheilchen dieses Verbindungsstückes sehr gering und geradezu ohne Bedeutung für das Gesammtresultat.

Die Kreisscheibe hatte, wie die aus Lindenholz bestehenden zwei Halbkugeln, welche die Nuss darstellten 11,5 mm Radius. Die beiden Halbkugeln wogen 3,196 grm, massen 6370 cmm und 1 cmm derselben wog somit 0,5017 mgm. Der Flügel war eine halbirte Kreisscheibe aus gutem Schreibpapier. Der Radius betrug 49 mm, und der qmm wog 0,0969 mgm.

Die einzelnen Stücke wurden mittelst minimaler Gummitröpfchen in der Weise, wie es die Figur darstellt, miteinander verklebt, so dass sie bei weicher Unterlage für die wenigen nothwendigen Fallversuche, welche die richtige Funktion bewiesen, zusammenhielten. Die Gummitröpfchen wurden nicht mit berechnet.

Da ausserdem für die Berechnung des Trägheitsmomentes in Bezug auf die z-Axe die Annahme symmetrischer Lage der Flügelfläche und der Versteifungsplatte zur Axe gemacht wurde, was in Wirklichkeit nicht zutrifft, da ja die Versteifungsplatte auf einer Seite der halbirten Kreisscheibe des Flügels aufgeklebt wurde, so geht daraus hervor, dass das ganze Berechnungsresultat nur ein annähernd richtiges ist, welches freilich bei der geringen Bedeutung der Fehler, bei der sehr sorgfältigen Auswahl des Materiales und ebensolcher Ausführung

der Wahrheit nahe kommen muss. Die Hauptdurchmesser des Zentralellipsoides verhalten sich danach = y : x : z = 2 : 2,52 : 7,8. Die Berechnung führe ich indessen ihrer grossen Weitläufigkeit, sowie des Mangels näheren Interesses halber nicht weiter an. Berechnung des Trägheitsmomentes ganzer Modellreihen, welche ursprünglich beabsichtigt war, wurde unterlassen, nachdem sich herausgestellt hatte, dass bei der Undurchführbarkeit irgend welcher näheren Berechnung der angreifenden Kräfte der ebenso wie zur Anfertigung nöthige sehr bedeutende Zeitaufwand nicht im Verhältniss zum Resultat stehen würde.

2. Was die Beziehungen zwischen Axenneigung einer Platte resp. eines Organs des XII. Typus und Flächenwinkel mit dem Horizont angeht, von welch letzterem beim senkrechten Fall z. B. die Richtung und Grösse der wirksamen Luftwiderstandskomponenten abhängt, so gehen dieselben aus folgender einfachen Betrachtung hervor: das Parallelogramm ABCD (Fig. 10 Taf. VIII) stelle eine nach zwei Axenrichtungen geneigte rechtwinkelige Platte dar.

Die Kanten AB und AC haben bekannte Neigungswinkel (α und β) zum Horizont. Denkt man sich nun die Kante BD verlängert und durch ihre Fortsetzung, sowie durch die Kante AB eine Ebene gelegt, so wird diese Ebene, wenn die Platte mit ihrem Eck A auf einer Horizontalebene ruhend gedacht wird, letztere in der Linie AE schneiden und wir bekommen somit das rechtwinkelige Dreieck ABE. Fällen wir nun noch Senkrechte von B und C auf die Horizontalebene und verbinden die Fusspunkte F mit A und E, und G mit A, ziehen wir ferner von B aus eine die Linie AE unter rechtem Winkel treffende Gerade BH, so ist der Winkel BHF (wenn wir H mit F verbinden) = ξ der gesuchte Neigungswinkel des Dreiecks ABE und damit auch der Platte ABCD, von der ersteres ja nur eine Fortsetzung ist. In dieser Konstruktion sind nun gegeben die Winkel α und β, und die Länge der Dreieckseite AB. Alle übrigen Stücke lassen sich, soweit sie nicht schon (als rechte Winkel) bekannt sind, berechnen. In dem rechtwinkeligen Dreieck BFH ist $\sin \xi = \frac{BF}{BH}$; $BF = AB \cdot \sin BAF$; $BH = BE \cdot \sin BEA$, oder, da $BE = \frac{BF}{\sin BEF}$, $\sin BEA = \frac{AB}{AC}$, und $AE = \sqrt{BE^2 + AB^2}$, so ist auch $BH = \frac{AB \cdot \sin BAF}{\sin BEF} \cdot \frac{AB}{\sqrt{AB^2 + \left(\frac{AB \cdot \sin BAF}{\sin BEF}\right)^2}}$;

da nun Winkel BEF = CAG = β und Winkel BAF = α ist, so bekommen wir durch Einsetzen dieser Bezeichnungen und Reduktion schliesslich die Formel

$$\sin \xi = \sqrt{\sin^2 \alpha + \sin^2 \beta}$$

welche den Winkel ξ aus α und β zu berechnen gestattet.

3. Zur „Mechanik" Seite 287 ist folgendes zu bemerken: Was die Berechnung des Verhältnisses der Druckgrössen, welche hier in Frage kommen, anlangt, so ist an eine prinzipielle Lösung der Frage, nament-

lich in Bezug auf Plattengestalt, Schwerpunktslage u. s. w. gar nicht zu denken. Eine allgemein gültige Bewegungsgleichung aufzustellen ist zur Zeit und vielleicht überhaupt unmöglich, selbst wenn man das Luftwiderstandsgesetz genauer kennen würde. Sogar für den einzelnen Fall, bei noch so sehr vereinfachenden Annahmen stösst man beim Versuch einer Berechnung auf unüberwindliche Schwierigkeiten.

Kännte man z. B. für eine bestimmte Lage eines Organes, sagen wir bei 32 cm Fallhöhe (entspr. der Fig. 2g Taf. VIII), die Fallgeschwindigkeit und die horizontale Drehgeschwindigkeit, sowie den Angriffspunkt des senkrecht aufwärtsgerichteten Luftwiderstandes genau und man wollte berechnen, mit welcher Kraft die senkrecht abwärts gerichtete Komponente des der Horizontaldrehung entgegengerichteten Luftwiderstands das Flügelende abwärts dreht, so ist selbst annähernde Berechnung unmöglich.

Die aufwärts drehende Hebelkraft für eine bestimmte Lage zu berechnen ist annähernd möglich, wenn man die Druckgrösse der senkrecht aufwärts wirksamen Komponente für ein Flächenelement mit bestimmtem Abstand von der Drehaxe berechnet. Dabei ist der Sinus des Neigungswinkels gegen die Widerstandsrichtung mit einzuführen. Die Differentialsumme der statischen Momente der einzelnen Drücke zwischen dem kleinsten und grössten Hebelarm ist dann zu berechnen. Diese statischen Momente wachsen mit der ersten Potenz des wirksamen Hebelarmes. Bei gleicher Grösse des Druckes $mv^2 = w$ auf gleichgrosse Flächentheilchen der Platte ist der Druck, welchen ein Flächenelement dx erleidet, gleich wdx und das statische Moment eines Flächenelementes, welches den Abstand x von der Drehaxe besitzt, gleich wxdx. Für eine Längsreihe von Flächenelementen mit dem Abstande o bis r erhalten wir somit

$$w \int_o^r x dx = w \frac{r^2}{2}.$$

Findet beiderseits der Drehaxe gegensinniger Druck statt, so gibt die Differenz der beiden gegensinnigen statischen Momente das statische Gesammtmoment, mit dem die Drehwirkung erzeugt wird. Die Drehgeschwindigkeit ist, abgesehen von sonstigen Widerständen gleich dem Quotienten des Trägheitsmomentes in Bezug auf die betreffende Drehaxe in das statische Moment.

Das Trägheitsmoment in Bezug auf jede beliebige Schwerpunktsaxe der Platte ist aus dem Zentralellipsoid, welches auf die früher angegebene Art zu berechnen ist, zu entnehmen. Es entspricht nach Poinsot's Theorie der Grösse des mit der betreffenden Schwerpunktsaxe korrespondirenden Durchmessers des Zentralellipsoides.

Anders aber verhält es sich mit dem der Horizontalrotation entgegengesetzten Luftwiderstand, dessen senkrecht abwärts gerichtete Komponenten die drehende Platte längs horizontal zu stellen suchen. Die obige Berechnungsmethode der Gesammtdruckgrösse ist hier nicht mehr

zulässig, da die Drücke auf die einzelnen Flächenelemente sowohl in radialer als in tangentialer Richtung ganz verschieden sind. Bei einer in geneigter Lage um eine im Raum vertikale Axe frei drehenden Platte werden nämlich nur diejenigen Flächentheilchen unter dem, dem Neigungswinkel (Flächenwinkel) der Platte zum Horizont komplementären Winkel vom Luftwiderstande getroffen, welche in einer den Schwerpunkt in sich aufnehmenden horizontalen Ebene liegen. Genau genommen verhält sich die Sache folgendermassen: Denkt man sich beliebig viele senkrechte Ebenen, welche die Drehaxe in sich aufnehmen durch die Platte gelegt, so besitzen alle die von einer solchen Ebene getroffenen Flächenelemente die gleiche Neigung zu den bei der Drehung horizontal auf sie treffenden Luftstrahlen. Die Neigung nimmt dabei von den Flächenelementen, welche den grössten Winkel mit der Richtung der Strahlen, sowie zum Horizont besitzen, nach unten und oben resp. nach vorn und hinten ab bis sie gleich Null wird, wo somit auch der Widerstand gleich o ist, resp. zu paralleler Reibung wird.

Die Grenze hiefür ist gegeben durch die vertikale Axenebene, welche auf die Platte senkrecht auftrifft. Jenseits dieser wird die Platte überhaupt nicht mehr vom Luftwiderstande getroffen, indem der betreffende Plattentheil, resp. die entsprechende Seite rückwärts dreht. Bei einem etwaigen Berechnungsversuch des statischen Gesammtmomentes der vertikalen Komponenten dieses Widerstandes würde man somit zu kaum mehr integrablen Ausdrücken gelangen.

Was überhaupt die Grösse des statischen Momentes des Luftwiderstandes gegen Drehung anlangt, so wäre diese bei Platten, deren Flächentheilchen alle rechtwinklig oder mindestens unter gleichem schiefem Neigungswinkel getroffen würden, in der Weise zu berechnen, dass man erst die absolute Druckgrösse auf ein Flächentheilchen vom Radius 1 in ähnlicher Weise wie in den Zusätzen zum IX. Typus feststellt. Wenn z. B. der Radius zwischen o und r schwankt, so erhalten wir wie dort für den Gesammtwiderstand einer Längsreihe von Flächenelementen die Summe $mv^2 \int_0^r x^2 \, dx$. Es muss daher die Grösse des statischen Momentes eines Flächenelementes, da sie schon bei gleicher Widerstandsgrösse mit dem Radius (resp. Hebelarm) im einfachen Verhältnisse, also der ersten Potenz wächst, mit der dritten Potenz des Radius wachsen. Für das statische Gesammtmoment einer Längsreihe von Flächenelementen ergäbe sich somit die Summe

$$M = mv^2 \int_0^r x^3 dx = mv^2 \frac{r^4}{4} = w \frac{r^4}{4}$$

worin wie Seite 189 w den Druck auf die Flächeneinheit bei $r = 1$ in der betreffenden Masseinheit ausdrückt. Obschon diese Gleichung in unserem Falle nach dem vorausgehenden also nicht weiter anwendbar

ist, da sie nur für je eine radiale Reihe von Flächenelementen gilt und die Grösse des Druckes für den Hebelarm 1 bei jedem Radius wechselt, so zeigt sie doch wenigstens, wie sehr das statische Moment der abwärts drehenden Kräfte des Widerstandes gegen die Rotation unter gewissen Umständen über dasjenige der aufwärts drehenden Kräfte des Widerstandes gegen den Fall überwiegen muss. Dem statischen Momente $w\frac{r^4}{4}$ des ersteren Widerstandes steht dasjenige des letzteren mit nur $w\frac{r^2}{2}$ gegenüber.

Zur Verdeutlichung der verschiedenen Neigung der Flächentheilchen einer schief gestellten rotirenden Platte gegen den Luftwiderstand diene als Beispiel Fig. 9 Taf. VIII. Das Rechteck mnoh stelle die Vertikalprojektion einer länglich rechteckigen Platte dar, deren Schwerpunkt bei S liegt und deren Queraxe 25°, die Längsaxe 40° mit dem Horizont einschliessen. Der Flächenwinkel, resp. die grösste Neigung der Platte zum Horizont beträgt dann nach der in Zusatz 3 entwickelten Formel 51° 20'. Die Längskante no sei dem Beschauer zugekehrt, die Kante mh abgekehrt. Die Platte drehe sich nun um ihre im Raum vertikale Schwerpunktsaxe ξ in der Richtung der Pfeile in horizontaler Bahn ihrer Flächenelemente. Das durch die senkrechte Projektion der Axe ξ auf die Platte abgetrennte Stück aohl wird dabei vom Luftwiderstande getroffen und zwar wächst der Winkel unter dem die Flächentheilchen getroffen werden von dem Radius sa, wo er gleich Null ist, bis zum Radius sd, wo er 51° 20' erreicht. Von hier nimmt er wieder ab, beträgt auf dem Radius sg, welcher der Längsaxe (z) entspricht, gleich dem Neigungswinkel der Queraxe 25° und wird auf dem Radius sl wiederum Null.

4. Zu p. 290 und 291. Die Wirkung des Stabilitätsmomentes der Vertikalaxe bei der Horizontalstellung der Organe ist gegenüber jener des Luftwiderstandes gegen die Rotation so gering, dass die Gravitation der Momentanaxe nach der stabilen Vertikalaxe des Körpers nur minimal beschleunigt und die Ablenkung derselben von ihr nur minimal gehemmt wird. Der Luftwiderstand allein für sich erzeugt schon die Bewegung, was am besten daraus hervorgeht, dass manche Formen, wie das Versuchsorgan von Cedrela sich in einer Stellung erhalten können, wo die Längsaxe einen sehr ansehnlichen Neigungswinkel zum Horizont macht. In dieser Stellung muss nämlich bereits eine relativ bedeutende Gravitation der Momentanaxe gegen die Längsaxe des Körpers, welche die bei weitem stabilste aller Körperaxen ist, stattfinden. Dieselbe wird gleichwohl von dem durch die Rotation erzeugten Luftwiderstande überwunden.

Eine Berechnung der Grösse des Stabilitätsmomentes hätte keinen Zweck, da die Drehgeschwindigkeit der berechenbaren Modelle nicht genau genug festgestellt werden konnte.

5. Zwei kleine Aufsätze von Professor Dr. F. Ludwig, welche hierhergehörige Themata behandeln, sind erst längere Zeit nach Beginn

des Druckes vorliegenden Buches zu meiner Kenntniss gelangt. Es sind: „Die Luftschraubenbewegung mancher Früchte“ im Sitz.-Ber. der bot. Vers. f. Gesammtthüringen Bd. V Heft 3, Jena 1886, S. 65 und „Noch einmal die Schraubenflieger“ ebendas. Bd. VI Heft 1 u. 2 S. 4 u. 5. Die Originalabhandlungen habe ich nicht zu Gesicht bekommen.

Nach dem eigenhändigen Referat über dieselben, in Rosenthals „Biolog. Zentralblatt Bd. VIII. 1888—1889 S. 141 u. 142 macht der Verfasser auf die Einrichtungen der Flugorgane des XII. Haupttypus aufmerksam und führt einige von Müllenhoff ähnlich wie für die Vögel berechnete Beispiele von Organen meines X. und XII. Haupttypus an, deren Leistungsgrösse für Ausnützung der vertikalen Komponenten des Luftwiderstandes beim Fall nach der Formel für die sog. relative Segelgrösse bestimmt wurde. Nachdem die interessante Mittheilung keine Fallgeschwindigkeiten angibt, so ist ein Vergleich mit meinen eigenen Beobachtungsresultaten trotz der zum Theil gleichen Arten nicht zulässig. Den vom Verfasser gleichzeitig für Formen meines X. und XII. Haupttypus gewählten, sehr bezeichnenden Namen „Schraubenflieger“ habe ich (s. pag. 331) für die Formen des XII. Typus adoptirt.

Anhang.

Zwischentypen.

Eine überaus grosse Anzahl von pflanzlichen Flugorganen lassen sich, wie bereits betont, nicht ohne weiteres in den bisher aufgestellten 12 Haupttypen unterbringen. Man könnte es höchstens mit einem Zwang thun, welcher den Typen jeglichen Eintheilungswerth rauben würde. Andererseits, wollte man alles, was ich unter den Begriff der Zwischentypen fasse, als besonderen Typus aufstellen, so würde die Zahl der Typen sehr gross werden und alle einfachen mechanischen Gesichtspunkte gingen dabei verloren.

Ich will hier durchaus nicht auf die Betrachtung einer grösseren Zahl solcher Zwischentypen näher eingehen, es wäre das eine endlose Arbeit, wobei doch immer wieder schon gesagtes neu wiederholt werden müsste, sondern nur ein charakteristisches Beispiel eines „zusammengesetzten Zwischentypus" herausgreifen. Die „einfachen Zwischentypen" übergehe ich ganz. Die zusammengesetzten Zwischentypen sind, wie früher schon ausgeführt wurde, in doppelter Weise ausgestattet, d. h. die zugehörigen Organe besitzen gleichzeitig mehrerlei Flugeinrichtungen, welche sich gegenseitig in ihrer Wirksamkeit unterstützen oder sogar bedingen. Unter diese Formen wären beispielsweise zu rechnen die

Samen von Catalpa bignonioides (Bignoniac.)

Wie die meisten Bignoniacen-Samen stellen dieselben lange, schmale, flach gedrückte Organe dar. Die achterförmige plattgedrückte, nur wenig konvexe Nuss wird von einem Flügelrande umgeben, welcher nach 2 Richtungen lang ausgezogen ist und nicht wie bei den meisten andern verwandten Formen abgerundete oder stumpfe Enden zeigt, sondern sich fast spitz verschmälert und am Ende in einen etwas pinselförmigen, verlängerten Haaranhang zerfasert ist. Die durchschnittlichen Dimensionen wohl ausgebildeter reifer Samen betrugen $7^1/_2$ mm grösste Breite auf 30 mm Länge der Platte. Die Haarschöpfe massen je etwa 7—10 mm grösste Länge.

Die Organe sind der Fläche nach schwach doppelt gekrümmt, und zwar der Länge nach konvex und der Quere nach konkav, so dass sie etwas gebogene flache Rinnen vorstellen.

Im Gesammtumriss stellt ein solcher Same eigentlich nichts anderes, als eine längliche Platte dar und man sollte erwarten, dass er ähnlich wie eine solche funktioniren würde. Die längliche Platte mit zentrischem Schwerpunkt stellt sich, wenn sie ganz flach ist, wie wir gesehen haben, horizontal und dreht sich um ihre horizontale Längsaxe; wenn sie in der Fläche etwas gekrümmt ist, macht sie die erstere Bewegung ebenfalls, indem sie ihre konvexe Fläche nach abwärts kehrt, und ausserdem häufig noch eine zweite, indem sie sich um ihre vertikale Axe horizontal dreht.

Die normalen Samen von Catalpa bignonioides thun nur das letztere und zwar aus dem Grunde, weil der beiderseitige Haaranhang in Folge seines grossen Reibungswiderstandes sie an der ersteren Bewegung hindert. Schneidet man denselben nämlich ab, so ist auch die erstere Bewegung möglich. Die Stellung des fallenden Samens ist dabei eine solche, dass die Längskrümmung ihre Convexität und die Querkrümmung ihre Conkavität nach unten richten. Auf diese Art kommt hier also eine, wenn auch nicht sehr ausgeprägte konkave Widerstandsfläche zur Funktion und ist im Stande, den geringeren Widerstand, welchen die konvexe Längskrümmung erzeugt, bis zu einem gewissen Grade zu kompensiren. Durch die beiderseitigen Haaranhänge wird aber eine hohe Stabilität der Lage des Organs, welches an sich, relativ zu seiner Fläche ziemlich schwer ist, erzeugt. Es dreht sich gleichzeitig, wenn auch meist nicht schnell (wiederum wegen der hemmenden Haaranhänge) in horizontaler Richtung um seine Vertikalaxe.

3 m Fallhöhe wurden aus längssenkrechter Fallstellung von einem mittleren Versuchsorgan durchfallen in 2 Sek. Nach Entfernung der Haare durchfiel das Organ zwar meist auch noch in horizontaler drehender Stellung aber bereits in 1,7 Sekunden den gleichen Fallraum. Öfter ging es in senkrechte Drehung um seine horizontale Längsaxe über, doch war der Beginn dieser Bewegung sehr unregelmässig.

Ob der pinselförmige Haaranhang die Vortheile der letzteren Bewegung, welche nachgewiesenermassen sehr bedeutend sein können, vollständig ersetzt, bleibt einstweilen zweifelhaft und wäre erst näher zu untersuchen. Die Verfolgung solcher Spezialfragen lag ausserhalb des Planes vorliegender Arbeit.

IV. Abschnitt.

Gesammt-Überblick.

Mit dem bisherigen ist die Antwort auf die Frage, welche ich mir gestellt hatte, soweit gegeben, als es unter den gegenwärtigen Umständen und mit den Hülfsmitteln, welche mir zu Gebote standen, möglich war.

Die Frage lautete: Wie verlaufen bei den verschiedenen Ausrüstungen der Flugorgane die Bewegungsvorgänge, resp. welches ist ihre Mechanik und welche Leistungsfähigkeit behufs Ausnützung des Luftwiderstandes kommt ihnen beim Fall in ruhiger Luft zu?

Die Antwort lautet: Die Art der mechanischen Vorgänge ist bedingt durch die Gestalt und die Massenvertheilung. Die Leistungsfähigkeit $\left(\text{Lg} = \frac{\text{theoretische Geschwindigkeit}}{\text{beobachtete Geschwindigkeit}}\right)$ wenigstens für Ausnützung des Luftwiderstandes beim Fall in ruhiger Luft hängt zunächst von dem Grössenverhältnisse $\frac{\text{Widerstandsfläche}}{\text{Gewicht}}$ ab, erleidet aber bedeutende Modifikationen durch die Grösse, die Gestalt und die Massenvertheilung. Sie ist also eine Funktion dieser variabeln Grössen.

Mit Übergehung von Zwischenformen („einfachen“ und „zusammengesetzten Zwischentypen“) ergaben sich 12 Hauptformen („Haupttypen“) der pflanzlichen Flugorgane, welche sich nach der Art ihrer Bewegung beim Fall in ruhiger Luft folgendermassen gruppiren:

A. Fallbewegung typisch ohne Drehung verlaufend.

I. Gruppe. Typisch geradlinige lothrechte Bewegung ohne Drehung, auf stabiler oder mindestens indifferenter Gleichgewichtslage in Folge entsprechender Schwerpunktslage und symmetrischer Gestalt der mehr oder minder konvexen Angriffsfläche beruhend.

a. Organe ohne besondere flächenvergrössernde Anhänge. Körperdimensionen sehr gering, unter die Dicke der adhärirenden Lufthülle herabsinkend, so dass die wirksame Widerstandsfläche durch letztere sehr ansehnlich vergrössert wird.

(I.) Haupttypus der **staubförmigen.** Leistungsgrösse (Lg) mit Abnahme der Körpergrösse steigend von 1 bis zu sehr bedeutender Grösse. Beobachtet beispielsweise 51.

b. Organe ohne besondere flächenvergrössernde Anhänge. Körperdimensionen gering, daher die Masse im Verhältniss zur Widerstandsfläche relativ gering.

(II.) Haupttypus der **körnchenförmigen.** Lg unter 1 bleibend. Beobachtet beispielsweise 0,74.

c. Organe mit besonderen flächenvergrössernden Anhängen.

(III.) Haupttypus der **blasig aufgetriebenen.** Die Organe besitzen eine geschlossene oder durchbrochene isodiametrische Hülle von bedeutenderen Dimensionen. Lg unter 1 bleibend. Beobachtet beispielsweise 0,7.

(IV.) Haupttypus der **haarförmigen.** Die Organe besitzen haarförmige Anhänge, deren Horizontalprojektion nach einer Dimension unter die Dicke der adhärirenden Lufthülle hinabsinkt, so dass ausser durch die Anhänge selbst auch noch durch letztere die wirksame Widerstandsfläche vergrössert wird. Lg mit abnehmender Haardicke von 1 bis zu bedeutender Grösse zunehmend. Beobachtet beispielsweise 2,67.

(VI.) Haupttypus der **konvex scheibenförmigen.** Die Organe besitzen einen im Umriss kreisrunden, geschlossenen oder durchbrochenen Flügelanhang. Lg unter 1 bleibend. Beobachtet beispielsweise 0,93—0,96.

(VII.) Haupttypus der **fallschirmförmigen.** Die Organe besitzen einen im Umriss kreisrunden, geschlossenen oder durchbrochenen Fallschirm. Lg weit unter 1 blei-

bend. Beobachtet beispielsweise 0,44. (Bei Modellen mit konkav halbkugelschaliger Widerstandsfläche bis 1,58 möglich).

B. Fallbewegung unter kaum beschleunigten Einstellungsdrehungen verlaufend.

II. Gruppe. Von der lothrechten stark abweichende, in der Horizontalprojektion typisch geradlinige, in der Vertikalprojektion krummlinige fortschreitende Bewegung, unter langsamer Einstellungsdrehung um die horizontal gestellte Längsaxe der Organe verlaufend. Die Bewegung beruht auf zum Horizont, resp. zur Luftwiderstandsrichtung geneigter, stabiler Gleichgewichtslage, in Folge Verschiebung des Schwerpunktes gegen die eine (lange) Hauptdimension der plattenförmigen Organe.

(X.) Haupttypus der **länglich plattenförmigen mit einer belasteten Längskante.** Die Organe besitzen einen namentlich nach zwei Seiten sehr verlängerten äusserst dünnhäutigen Flügelanhang. (Verhältnissmässig der grösste bekannte). Lg sehr verschieden. Bei den in der Querrichtung flachen, leicht in Gleichgewichtslage sich einstellenden Formen beiläufig 1 bis darunter. Bei den die Gleichgewichtslage fortwährend überschreitenden (oszillirenden), in der Querrichtung etwas krummflächigen Organen steigt sie bedeutend an, von 1—2,49. Letztere Zahl ist die höchste an einem grösseren natürlichen Organ beobachtete und wird überhaupt nur von Formen des I. und IV. Typus übertroffen.

C. Fallbewegung unter stark beschleunigten Drehungen verlaufend.

III. Gruppe. Von der lothrechten abweichende, in der Horizontalprojektion typisch geradlinige, in der Vertikalprojektion krummlinige Bewegung des Schwerpunktes. Die Bewegung beruht auf beschleunigter Drehung um eine horizontal gestellte Axe der nur labile Gleichgewichtslage anneh-

menden Organe, welche zentrischen Schwerpunkt besitzen.

(V.) Haupttypus der **flachscheibenförmigen.** Die Organe besitzen einen geschlossenen, ringsumgehenden Flügelanhang. Um beliebige Schwerpunktsflächenaxen drehend. Lg über 1 ansteigend, bei Modellen bis 1,484. Beobachtet bei natürlichen Organen beispielsweise 1,129.

(VIII.) Haupttypus der **flügelwalzenförmigen.** Die Organe besitzen 3 bis mehrere längsgestellte Flügelanhänge. Sie können sich um je eben soviele quere Schwerpunktsaxen drehen, als sie Flügel besitzen, dabei stellt sich die Drehaxe horizontal. Lg über 1 ansteigend. Beobachtet beispielsweise zwischen 1,24 und 1,39.

(IX.) Haupttypus der **länglich plattenförmigen.** Die Organe besitzen einen nach zwei Seiten verlängerten symmetrischen Flügelanhang. Die Drehung findet nur um die Längsaxe statt. Lg bedeutend über 1 ansteigend, bei Modellen bis über 2. Beobachtet bei natürlichen Organen beispielsweise bis zu 1,48.

IV. Gruppe. Lothrechte geradlinige Bahn des Schwerpunktes bei beschleunigter horizontaler Rotation um eine mit der vertikalen Körperaxe mehr oder weniger zusammenfallende im Raum senkrechte Schwerpunktsaxe. Die Bewegung beruht auf der Verschiebung des Schwerpunktes nach zwei Richtungen (in der Diagonale) der länglichen Platten, wodurch Gleichgewichtslage unmöglich gemacht wird. Durch die entstehenden Schiefstellungen der Fläche bei sehr ungleicher Flächengrösse beiderseits der Queraxe entstehen starke horizontal drehende Kräfte, welche ihrerseits wieder durch die Horizontaldrehung in geneigter Lage horizontal stellende Drehkräfte erzeugen.

(XII.) Haupttypus der **länglich plattenförmigen mit einer schwach belasteten Längskante und einer stark belasteten Kurzkante.** Die Organe besitzen einen einseitig verlängerten, unsymmetrischen Flügelanhang. Lg in Folge gleichzeitiger fortwährender Oszillationen

um die Körperlängsaxe, welche ein zeitweiliges sich in die Höhe schrauben bedingen, bedeutend. Bei den typisch ausgebildeten natürlichen Organen Schwankungen zwischen 1,82 und 2,33 beobachtet.

V. Gruppe. Lothrechte geradlinige Bahn des Schwerpunktes, bei beschleunigter horizontaler Rotation um eine im Raum vertikale Schwerpunktsaxe und ebensolcher mehr oder weniger senkrechter Rotation um die Körperlängsaxe. Die Bewegung beruht auf der labilen Gleichgewichtslage in Bezug auf die Längsaxe und dem der Länge nach stark verschobenen Schwerpunkt. Durch die Vertikaldrehung um die Längsaxe entstehen beständig wiederholte schiefe Flächenstellungen, welche bei der Ungleichheit der Flächenvertheilung beiderseits der Queraxe starke, horizontal drehende Kräfte erzeugen.

(XI.) Haupttypus der **länglich plattenförmigen mit einer belasteten Kurzkante.** Die Organe besitzen einen einseitigen, verlängerten, symmetrischen Flügelanhang. Lg in Folge der vertikalen beschleunigten Drehung nicht unbedeutend erhöht, bei natürlichen Organen beispielsweise 1,38 erreichend.

Auf Grund der bisherigen Untersuchungen ergaben sich einige weitere Betrachtungen.

Zunächst lassen sich die 12 Haupttypen nach der Leistungshöhe der zugehörigen natürlichen Organe in absteigender Reihe folgendermassen ordnen:

I. Htps. Lg sehr schwankend. Von 1 bis sehr bedeutend. Beobachtet 51.

IV. „ „ sehr schwankend. Von 1 bis bedeutend. Beobachtet 2,67.

X. „ „ sehr schwankend. Von weniger als 1 bis bedeutend. Beobachtet bis 2,49.

XII. „ „ bedeutend mit geringen Schwankungen. Beobachtet zwischen 1,82 und 2,33.

IX. Htps. Lg schwankend. Von wenig über 1 bis ziemlich bedeutend. Beobachtet zwischen 1,097 und 1,48 (bei Modellen bis 2).

V. „ „ etwas schwankend. Nicht unbedeutend erhöht. Beobachtet von über 1 bis 1,129 (bei Modellen bis 1,48).

VIII. „ „ etwas erhöht. Beobachtet von 1,24 bis 1,39.

XI. „ „ etwas erhöht. Beobachtet 1,38.

VI. „ „ etwas unter 1 sinkend. Beobachtet 0,93—0,96.

III. „ „ unter 1 sinkend. Beobachtet 0,7.

II. „ „ unter 1 sinkend. Beobachtet 0,74.

VII. „ „ bedeutend unter 1 sinkend. Beobachtet 0,44. (Nach Modellen wäre Ansteigen bis 1,58 möglich).

Aus dieser Zusammenstellung geht hervor, dass die höchste Leistungsfähigkeit sehr stark verkleinerten Organen in Folge ihrer verhältnissmässig bedeutenden adhärirenden Lufthülle zukommt (I. u. IV.) Die nächsthohen Leistungen zeigen die typisch drehenden Typen, indem sie durch die lebendige Kraft ihrer Drehung bedeutendere Kompression der auftreffenden Luftstrahlen erzeugen, als bei geradliniger Bewegung ohne Drehung möglich wäre. Hierher gehören die Haupttypen X, XII, IX, V, VIII und XI. Obschon Typus X dabei die höchste beobachtete Einzelleistung zeigt, dürfte doch in der Durchschnittsleistung der XII. ziemlich bedeutend überwiegen, wie aus den unteren beobachteten Grenzen hervorgeht. Alle folgenden Typen VI, III, II und VII sinken unter 1 und zwar in Folge des seitlich erleichterten Luftabflusses.

Ziemlich verschieden gestaltet sich dagegen die Reihenfolge, wenn man nicht den bisherigen Massstab der Leistungsgrösse, sondern die absolute grössere oder kleinere Fallgeschwindigkeit zu Grunde legt.

Unter solchem Gesichtspunkt, nach der grössten gleichmässigen Fallgeschwindigkeit pro Sekunde betrachtet, ordnen sich die höchsten beobachteten Einzelleistungen folgendermassen:

Sporen von Lycoperdon caelatum (I.)	0,00445 m
Samen von Bignonia echinata (X.)	0,173 „

Samen	von	Pitcairnia imbricata (IV.)	0,3	„
„	„	Pinus sylvestris (XII.)	0,43	„
Früchte	„	Aspidosperma sp. (V.)	0,66	„
„	„	Cynara Scolymus (III.)	0,83	„
„	„	Ailanthus glandulosus (IX.)	0,91	„
Samen	„	Cochlospermum orenocense (VI.)	1,37	„
Früchte	„	Fraxinus excelsior (XI.)	2,0	„
„	„	Combretum sp. (VIII.)	3,0	„
„	„	Asterocephalus sp. (VII.)	3,8	„
Samen	„	Papaver somniferum (II.)	5,0	„

Diese Reihe gibt natürlich keine Basis für die möglichen Geschwindigkeitsminima bei den verschiedenen Typen ab, indem zu solchem Zweck sehr viel ausgedehntere Versuche angestellt werden müssten. Der VII. Typus figurirt beispielsweise hier ganz am Ende der Reihe, wogegen manche fallschirmtragenden Organe von mehr oder weniger ausgesprochen typischer Gestalt, z. B. viele Compositenfrüchtchen oder den haarähnlichen sich nähernde Zwischentypen sich der Fallgeschwindigkeit des hier an 3. Stelle stehenden Vertreters des IV. Haupttypus sehr nähern können.

Auffallender noch würde die Verschiebung, wenn man ausschliesslich die Organe benützen würde, welche die höchste Leistungsgrösse im sonst allgemein angewendeten Sinne zeigen, wie z. B. unter den Vertretern des XII. Typus die Früchte von Acer pseudoplatanus oder A. platanoides. Trotz ihrer hohen Leistungsfähigkeit fallen sie absolut genommen sehr viel rascher. Die Vertreter des II. Haupttypus, die Mohnsamen, welche an letzter Stelle stehen, fallen so rasch, dass man sie im Grunde kaum noch als richtige Flugorgane betrachten kann.

Schliesslich kann man noch die Grösse der Leistungsfähigkeit der Flugeinrichtungen, namentlich der besonderen Anhänge in dem Sinne prüfen, welche Lasten und mit welchem Effekt sie dieselben zu tragen vermögen. Die in solchem Sinne genommene Leistungsfähigkeit mancher Einrichtungen ist eine sehr bedeutende, wie daraus hervorgeht, wenn man die Organe, welche mit besonderen Flügelanhängen versehen sind, derselben entledigt und nunmehr auf ihre Fallgeschwindigkeit prüft. Diese Probe auf die

Leistungsfähigkeit ist natürlich nicht überall zulässig, in Folge dessen habe ich darauf verzichtet sie allgemeiner anzuwenden. Nichtsdestoweniger wurde sie in einer Anzahl von Fällen doch gemacht und ich theile hier einige wenige bei 6 m Fallhöhe erlangte Resultate beispielsweise mit. Die Zahlen der letzten Columne zeigen dabei immer an, um wie viel mal das ganze Organ mit Flugapparat langsamer fiel als die Nuss allein.

Name des Organs	Fallzeit auf 6 m Höhe in Sek.		Grösse der Fallverlangsamung
	Ganzes Organ	Nuss allein	
1. Cynara Scolymus (III.)	7,8	1,2	6,5 fach
2. Ptelea trifoliata (VI.)	4,4	1,4	3,14 „
3. Ailanthus glandulosus (IX.)	6,8	1,2	5,66 „
4. Zanonia javanica (X.)	15,2	2,4	6,33 „
5. Bignonia echinata (X.)	24,6	4,6	5,34 „
	„	3	8,2 „
6. Fraxinus excelsior (XI.)	2,8	1,4	2,0 „
7. Acer pseudoplatanus (XII.)	5,6	1,2	4,66 „

Es ist zu dieser kleinen Tabelle weiter nichts zu bemerken, als dass bei Nr. 5 die plattgedrückte, etwas konkavkonvexe Nuss mit verschiedener Geschwindigkeit fiel, je nachdem sie sich nach Art der Organe des IX. Typus drehte oder ohne Drehung, mit der Konvexität nach abwärts gerichtet bewegte. In letzterem Falle fiel sie bedeutend rascher. Die Fallverlangsamung schwankt bei den angeführten Organen überhaupt zwischen dem zweifachen und 8,2fachen. Abgesehen von Bignonia echinata zeigt die Achene von Cynara Scolymus die bedeutendste Verzögerung. Überhaupt leisten, absolut genommen, wohl die Haarapparate bei geringstem Materialaufwand unter allen Fluganhängseln das meiste.

Es läge nahe, an dieser Stelle eine Reihe von weiteren Gesichtspunkten ins Auge zu fassen, für welche mir Material vorliegt, namentlich die Frage nach der Baumaterialverwendung resp. deren Ersparniss.

Es würde aber viel zu weit führen, wenn ich diese Frage auch nur einigermassen eingehend erörtern wollte, es war die Beantwortung derselben nicht beabsichtigt. Ich kann aber wenigstens die Bemerkung nicht unterdrücken, dass hier sehr weite Grenzen möglich sind, und dass die Zweckmässigkeit einer jeden einzelnen Einrichtung durchaus nicht überall durchleuchtend ist.

Der Versuch, alles als zweckmässige Einrichtung erklären zu wollen, stösst also gar häufig auf Hindernisse. Andererseits scheinen manche derartige Zweckmässigkeitsbeziehungen, auf welche bisher nicht geachtet wurde, obzuwalten. So scheint z. B. zwischen dem Auftreten einiger typischer Ausbildungen und der Höhe über dem Boden, in der sie zur Entwicklung kommen, ein gewisses Verhältniss zu existiren.

Ausser dem Materialaufwand an sich repräsentirt bei der Entstehung von Flugapparaten in oft bedeutenden Höhen der Transport der Stoffe einen nicht unbedeutenden Arbeitsaufwand. Diese Arbeit ist in dem reifen Flugorgan als potentielle Energie enthalten und kommt beim Fall durch Erzeugung lebendiger Kraft, welche bei den drehenden Typen eine zum Theil wenigstens sehr hohe Ausnützung des Luftwiderstandes gestattet, zur Verwerthung.

Nachdem nun, wie es bis jetzt scheint, gewisse Typen ausschliesslich auf hochwüchsige Pflanzen beschränkt sind, so liegt, wenn auch nicht der Zwang, doch die Möglichkeit vor, dass dies desshalb der Fall ist, weil nur in diesem Falle eine Ausnützung der Einrichtung möglich ist.

Solche wie es bis jetzt scheint ausschliesslich mehr oder weniger hochwüchsigen Pflanzen zukommende Flugeinrichtungen sind die Typen X, XI und XII. Die beiden ersteren sind freilich sehr wenig verbreitet, und es wäre allzu kühn, wollte man auf das vielleicht zufällige Zusammentreffen sofort einen derartigen Gedankengang gründen. Bei dem XII. Typus dagegen ist es anders. Derselbe findet sich, wie wir gesehen haben, ganz ausserordentlich verbreitet und hier würde es bei weiterer Bestätigung der bisher bekannten Ausschliessung von ganz niederwüchsigen, nament-

lich krautartigen Pflanzen nicht unberechtigt sein, wenigstens an solche Möglichkeiten zu denken.

Dazu kommt, dass wenigstens die schwereren Formen der Flugorgane des XII. Typus, wenn sie einmal auf dem Boden liegen, nicht leicht mehr, selbst durch sehr starke Luftströme in die Höhe geführt werden können. Versuche, welche man mit Hülfe eines starken Blasbalges, z. B. mit Ahornfrüchten leicht machen kann, illustriren das aufs beste.

Nach dieser und ähnlichen Richtungen hin liegt ein weites Feld biologischer Forschung.

Schliesslich bleibt mir zur vorliegenden Materie noch ein letzter, an sich zwar ganz unwesentlicher Punkt übrig, welchen ich aus gewissen praktischen Rücksichten gleichwohl nicht ganz übergehen zu sollen glaube. Derselbe bezieht sich auf die Terminologie der aufgestellten Gruppen.

Die für die Haupttypen gewählten Bezeichnungen sind für häufigeren Gebrauch, namentlich wenn man eine möglichst kurze funktionelle Charakteristik eines Flugorgans geben will, meist viel zu schwerfällig. Ich möchte in Folge dessen zur Benennung meiner 12 Haupttypen einstweilen folgende Namen vorschlagen, welche je mit dem durch die Ziffer bezeichneten Haupttypus der bisherigen Aufzählung zusammenfallen. In Klammern dahinter folgt ein nach einem Hauptvertreter des betreffenden Typus gewählter Name, welcher eventuell als gleichbedeutend anwendbar wäre:

I. Staubflieger (Sporentypus).
II. Körnchenflieger (Mohntypus).
III. Blasenflieger (Cynaratypus).
IV. Haarflieger (Pitcairniatypus).
V. Scheibendrehflieger (Aspidospermatypus).
VI. Napfflieger (Eccremocarpustypus).
VII. Schirmflieger (Asterocephalustypus).
VIII. Walzendrehflieger (Halesiatypus).
IX. Plattendrehflieger (Ailanthustypus).
X. Segelflieger (Zanoniatypus).
XI. Schraubendrehflieger (Eschentypus).
XII. Schraubenflieger (Ahorntypus).

Diese Namen sind ohne weiteres verständlich und bedürfen keiner näheren Motivirung.

Die Zwischentypen lassen sich kurz überhaupt nur durch den Namen eines Vertreters charakterisiren. Um für solche ebenfalls wenigstens je ein Beispiel anzuführen, könnte man für den „einfachen Zwischentypus“ zwischen dem Pitcairnia- und Asterocephalustypus den Namen Compositentypus, für den „zusammengesetzten Zwischentypus“ zwischen dem Pitcairnia- und Ailanthustypus den Namen Catalpatypus anwenden.

Figurenerklärung.

Tafel I.

Die Tafel enthält aussschliesslich schematische oder nach vereinfachten Modellen angefertigte Figuren der zwölf unterschiedenen Haupttypen. Dieselben sind entsprechend der im Texte befolgten Ordnung und Nummerirung mit I—XII bezeichnet. N bedeutet immer die Nuss, s den Schwerpunkt, die punktirten Linien yy, xx und zz bedeuten die den Hauptdimensionen entsprechenden Axen, welche mit Hauptträgheitsaxen der Körper zusammenfallen. Bei flächenhafter Ausbildung bedeutet y immer die zur Fläche senkrechte Vertikalaxe, x die Queraxe und z die Längsaxe. Weiteres ist bei den einzelnen Figuren angegeben.

Fig. I. Schematische Figuren vergrössert gedachter staubförmiger Körper. (z. B. von Sporen oder Spaltpilzen) mit durch punktirte Umgrenzung angedeuteter Lufthülle (Sporentypus).

Fig. II. Sch. F. von Organen des körnchenförmigen Haupttypus, kleine kugel- und stäbchenförmige Körper in natürlicher Grösse darstellend (Mohntypus).

Fig. III. Sch. F. von Organen des III. Haupttypus der blasenförmig aufgetriebenen. 1. Organ mit geschlossener Hülle von aussen gesehen, 2. medianer Durchschnitt eines Organs mit durchbrochener Hülle, 3. med. Dchschn. eines Org. mit geschlossener Hülle und einseitig verschobenem Schwerpunkt. y bedeutet die bei letzterem vorhandene einzige stabile Hauptträgheitsaxe. Bei 1 und 2 sind alle Axen gleich (Cynaratypus).

Fig. IV. Sch. F. eines haarförm. Organs (Pitcairniatypus).

Fig. V. Sch. F. eines flach scheibenförm. Organs. 1. von der Fläche 2. im medianen Vertikaldurchschnitt gesehen. y bedeutet die einzige hier vorhandene stabile Hauptträgheitsaxe des Körpers (Aspidospermatypus).

Fig. VI. Sch. F. von Organen des VI. Haupttypus der konvex scheibenförmigen. 1. Flächenansicht, 2. medianer Vertikaldurchschnitt eines Organs von napfförmiger Gestalt mit konkav-konvex gekrümmtem Flügel, 3. med. Vertik.-Dchschn. eines Org.'s mit ebenem Flügel. y bedeutet die einzige hier vorhandene stabile Hauptträgheitsaxe (Eccremocarpustypus).

Fig. VII. Sch. F. eines fallschirmförm. Organs. 1. Flächenansicht des Fallschirms von oben, 2. die einzige Symmetrieaxe y des Körpers in sich aufnehmender Medianschnitt. Die Axe y ist zugleich die

einzige hier vorhandene stabile Hauptträgheitsaxe (Asterocephalustypus).

Fig. VIII. Sch. F. eines Modelles eines 4 flügeligen flügelwalzenf. Organs. 1. Seitenansicht, y Längsaxe, zugleiche einzige theoretisch stabile Hauptträgheitsaxe des Körpers, z eine der Queraxen. 2. medianer senkrecht zur y-Axe geführter Querschnitt. x, z, x', z' die 4 theoretisch nicht stabilen, dagegen beim Fall in der Luft stabilen Queraxen (Halesiatypus).

Fig. IX. Sch. F. des Modelles eines länglich plattenf. Organs. 1. Flächenansicht, 2. medianer Vertikallängsschnitt, 3. medianer Vertikalquerschnitt (Ailanthustypus).

Fig. X. Sch. F. des Modells eines länglich plattenf. Organs mit einer belasteten Längskante (Zanoniatypus). 1. Flächenansicht, 2. die Längsaxe in sich aufnehmender Vertikalschnitt, 3. medianer Vertikalquerschnitt. v Vorderrand oder Vorderkante, h Hinterr. od. Hinterk.

Fig. XI. Sch. F. des Modells eines länglich plattenf. Organs mit einer belasteten Kurzkante (Eschentypus). 1. Flächenansicht, 2. medianer Vertikallängsschnitt, 3. die Queraxe in sich aufnehmender Vertikalschnitt. o oberer Rand, u unterer Rand (untere oder belastete Kurzkante).

Fig. XII. Sch. F. des Modelles eines längl. plattenf. Organs mit einer schwach belasteten Längskante und einer stark belasteten Kurzkante (Ahorntypus). 1. Flächenansicht, v Vorderrand, h Hinterrand, o oberer, u unterer Rand, 2. die Längsaxe in sich aufnehmender Vertikalschnitt, 3. die Queraxe in sich aufnehmender Vertikalschn.

Tafel II.

Abbildungen natürlicher Organe in natürlicher Grösse. Die mit x, y, z bezeichneten punktirten Linien bedeuten genau wie in den Figuren IX bis XII auf Taf. I die entspr. Hauptträgheitsaxen. Der Kreuzungspunkt dieser Axen gibt die Lage des Schwerpunktes an. Die beistehenden röm. Ziffern entsprechen denen der Taf. I.

Fig. 1. Samen von Papaver somniferum, von der Seite und von unten, d. h. von seiner Widerstandsfläche beim senkrechten Fall gesehen.

„ 2. Achene von Cynara Scolymus. Die gegen den Beschauer gerichteten Pappusstrahlen sind weggenommen. Die Figur gibt den Habitus richtig wieder, ist aber in den Einzelheiten bei der Übertragung verunglückt.

„ 3. Samen von Pitcairnia imbricata.

„ 4. Samen von Cochlospermum orenocense. Flächenansicht.

„ 5. Frucht von Combretum spec. a Seitenansicht, b Ansicht in der Richtung der Längsaxe.

„ 6. Frucht von Halesia tetraptera. a Seitenansicht, b Ansicht in der Richtung der Längsaxe.

Fig. 7. Same von Entada abyssinica mit geflügelter Hülle. Flächenansicht.
„ 8. Frucht von Ailanthus glandulosus. Flächenansicht.
„ 9. Same von Tecoma stans. Flächenansicht.
„ 10. Früchtchen von Liriodendron tulipifera. a Flächenansicht, b Kantenansicht.
„ 11. Frucht von Fraxinus excelsior. Flächenansicht.
„ 12. Theilfrucht von Acer platanoides. Flächenansicht.
„ 13. „ „ Acer pseudoplatanus. Flächenansicht.
„ 14. Hülse „ Machaerium augustifolium. Flächenansicht.
„ 15. Theilfrucht von Hymenocardia Heudeloti (Euphorb.). Flächenansicht.
„ 16. Same von Pterospermum suberifolium (Büttneriac.). Flächenansicht.
„ 17. Same von Swietenia humilis (Cedrelac.). Flächenansicht.
„ 18. Same von Picea excelsa. a Flächenansicht, b Kantenansicht.
„ 19. Same von Pinus sylvestris. a Flächen-, b Kantenansicht.
„ 20. Same von Abies pectinata. Flächenansicht.

Tafel III.

Fortsetzung von Tafel II.

Fig. 1. Same von Aspidosperma spec. Flächenansicht.
„ 2. Frucht von Ptelea trifoliata. a Flächen-, b Kantenansicht.
„ 3. Same von Bignonia echinata. Flächenansicht.
„ 4. Same von Zanonia javanica. Flächenansicht. Längsaxe (z) und Schwerpunkt sind durch einen Irrthum um 1 mm zu nahe an den Vorderrand gerückt.

Tafel IV.

Fig. 1—8. Erklärung im Text. Fig. 2 bezieht sich auf den I., Fig. 3—5 auf den IV., Fig. 6 und 7 auf den VI. und Fig. 8 auf den VII. Typus.
Fig. 9 und 10. Zum VIII. Haupttypus gehörende schematische Querschnittsansichten von 3 und 5flügeligen Organen mit Andeutung der Lage ihrer theoretisch nicht stabilen, beim Fall in der Luft aber stabilen Queraxen w, x, z und u, v, w, x, z.

Tafel V.

Alle Figuren beziehen sich auf den IX. Typus.

Fig. 1. Schemat. Figuren von der Frucht von Ailanthus um den Ort und die Wirkung des Luftangriffs beim Beginn des Falles in senkrechter Stellung des fallenden Organes zu zeigen. a von der Fläche gesehen, b von unten (in der Längsrichtung) gesehen.
Fig. 2—6 Erklärung im Text.
Fig. 7. Vgl. den Text p. 175 und p. 189 unten.

Tafel VI.

Die Figuren 1—6 beziehen sich auf den IX., Figur 7 auf den X. Haupttypus.

Fig. 1. An der Wand befestigte kleine Vorrichtung, welche einem an beliebiger Stelle postirten Beobachter gestattet, plattenförmige Modelle in bestimmter Stellung und zu einem bestimmten Zeitpunkte fallen zu lassen. a Seiten-, b Vorderansicht. M ist das Modell. Vgl. Text p. 163.

Fig. 2 und 3. Bahn eines homogenen etwas unsymmetrischen Modelles aus starkem Schreibpapier, dessen Länge sich zur grössten Breite wie 5 : 1 verhielt. Aus einer sehr grossen Zahl von Fallversuchen annähernd genau festgestellt. 20fache Reduktion der natürlichen Grösse. Fig. 2 Aufriss, Fig. 3 Grundriss der Bahn, welche derjenigen vieler Ailanthusfrüchte vollkommen entspricht. Vgl. den Text p. 178 u. f.

Fig. 4. Ein Stück aus dem oberen Theil der in Fig. 3 horizontal projizirten Bahn eines homogenen unsymmetrischen Modells, schematisirt um die Wirkung der einzelnen Kräfte zu zeigen. c breites, d schmäleres Ende der Platte. Die Drehung um die Längsaxe ist weggelassen, die Grösse der übrigen Drehungen übertrieben. Vgl. Text p. 178 u. f.

Fig. 5 und 6. Zur Erläuterung der Verhältnisse bei den Axenneigungen in Folge der Axenstabilität. Vgl. Text p. 181 u. f.

Fig. 7. Annähernde Schwerpunktsbahn eines nicht oszillirenden Samens von Bignonia echinata. Vgl. Text p. 196.

Tafel VII.

Die Figuren 1—4 beziehen sich auf den X., die Figuren 5 und 6 auf den XI. Haupttypus.

Fig. 1. Anfängliche Fallbahn des Schwerpunktes des Versuchsorgans I von Bign. echin. aus quersenkrechter Fallstellung um die Sekundärkurven zu zeigen. Annähernd. Reduzirt. Die Zahlen bedeuten Centimeter. Vgl. Text p. 198.

Fig. 2. Fallbahnen eines Punktes des Vorderrandes eines Modelles aus Lindenholz, dessen medianer Vertikalquerschnitt in AB Fig. 4e (s. dort!) dargestellt ist und dessen Schwerpunkt durch Verschiebung der Belastung eine verschiedene Lage s_1, s_2 und s_3 angenommen hat. Die mit den gleichen Ziffern bezeichneten Kurven entsprechen den verschiedenen Schwerpunktslagen. Das Gewicht des Modelles blieb dabei das gleiche. Nach sehr zahlreichen Fallversuchen mit Intervallen von 10 zu 10 cm bis zu einer Höhe von 250 cm aufgenommen. Die Fallstellung war überall die gleiche und ist in ihrem Verhältniss zur lothrechten in Fig. 4e genau wiedergegeben. Die Stellung der Vorderkante (B) war dabei horizontal. Die Kurven entsprechen nahezu den wirklichen Schwerpunktsbahnen, welche direkt zu messen nicht möglich war.

Fig. 3. Erkl. im Text p. 217.

Fig. 4a und b. Schematische Figuren zur Erläuterung der Entstehung der Oszillationen. AB stellt in beiden Fällen ein in typischer Bewegung begriffenes oszillirendes Modell im vertikalen Medianquerschnitt dar. Die fortschreitende Bewegung geht jedesmal in der Richtung des Pfeiles p vor sich. Im ersten Falle entstehen durch die Resultirenden des Luftwiderstandes ra und r'a' die wirksamen Komponenten ta und t'a', welche beide gleichsinnige Drehungen um den Schwerpunkt s erzeugen. Der Vorderrand A wird in der Richtung des Pfeiles aufwärts, der Hinterrand B ebenso abwärts gedreht. Bei b ist der Angriffspunkt a der Resultirenden ra hinter den Schwerpunkt gerückt, in Folge dessen dreht die wirksame Komponente ta den Hinterrand B aufwärts und den Vorderrand A abwärts. Solche Überschreitungen der Gleichgewichtslage finden abwechselnd gegensinnig statt.

c. Das auf Fig. 4 Taf. III in der Fläche dargestellte Versuchsorgan I von Zanonia javanica in Kantenstellung, um die Flächenkrümmung der Länge ef nach zu zeigen. Die Vorderkante vk gegen den Beschauer gerichtet. hk ist die Hinterkante. In der Mitte der, der Länge nach rechts etwas ausgebauchten Fläche ist rechterseits die Nuss ab sichtbar.

d. medianer Vertikalquerschnitt durch das gleiche Organ wie c, und zwar in der Richtung der punktirten Linie cd der vorigen Figur geführt. mn die Nuss, s der Schwerpunkt, vk die Vorderkante, hk die Hinterkante.

e. medianer Vertikalquerschnitt eines 50 mm breiten 100 mm langen rechteckigen Modelles aus Lindenholz, welches bei den verschiedenen Schwerpunktslagen $s_1 - s_3$ die Kurven Fig. 2 erzeugte. Die Abschnitte der Queraxe verhielten sich bei $s_1 = 14{,}5 : 45{,}5$; bei $s_2 = 16{,}15 : 43{,}85$; bei $s_3 = 17{,}75 : 42{,}25$. Die Belastung bestand in 5 gleichschweren Messingwanzen, welche in einer Entfernung von 2,75 mm (s_1), 10 mm (s_2) und 12,75 mm (s_3) vom Vorderrande B auf der oberen (konkaven) Fläche in einer Linie und in regelmässiger Anordnung eingestochen wurden. Dieselben sind auf der Figur weggelassen. Das ganze Modell wog 3,617 grmm. Bei weiterer Entfernung des Schwerpunkts vom Vorderrand funktionirte das Modell nicht mehr.

Fig. 5. Schematische Darstellung der Bahn und Bewegung eines Modelles von Liriodendron tulipifera. ss.. Schwerpunktsbahn, a — f verschiedene Stellungen während der Bewegung. zz Körperlängsaxe, um welche die mehr vertikalen Drehungen vor sich gehen. $\xi\xi$ die im Raum vertikale Schwerpunktsaxe, um welche die Horizontaldrehungen stattfinden. Diese Axe fällt nach dem Beginn der Drehungen mit der Schwerpunktsbahn selbst zusammen. Die Pfeile deuten die Drehungsrichtungen an. Vgl. hiezu den Text p. 234, sowie folgende Figur.

Fig. 6. Das gleiche Modell in der Stellung c der vorigen Figur und

zwar von oben in der Richtung auf seine etwas konkave Fläche gesehen. z ist die Längsaxe, y die etwas perspektivisch gesehene Vertikalaxe des Körpers, ξ ist die im Raum vertikale Schwerpunktsaxe, $+\xi$ und $+y$ treten nach vorn $-\xi$ und $-y$ nach hinten aus der Papierebene heraus. ψ ist die im Raume horizontale Schwerpunktsaxe, welche in dieser momentanen Stellung des Modelles, da dessen Fläche in der Papierebene liegt, mit der Körperqueraxe x zusammenfällt. Die durch die Pfeile angedeuteten Drehungen um die ξ und z Axe fallen mit denjenigen in der vorigen Figur zusammen.

Tafel VIII.

Sämmtliche Figuren beziehen sich auf den XII. Haupttypus.

Fig. 1. a u. b. Genaue Wiedergabe des Seite 249—251 und Zusatz 1 Seite 310—313 beschriebenen und berechneten Modelles in natürlicher Grösse. a Flächenansicht, b Kantenansicht von der Vorderkante aus gesehen. xx, yy, zz bedeuten die drei Hauptträgheitsaxen wie Fig. XII Taf. I. N Nuss, F Flügel.

c. Auf $^2/_3$ der natürlichen Grösse reduzirte genaue Flächenansicht des auf S. 251 und in dem Zusatze 1 S. 313 bis 314 beschriebenen Modelles. Bezeichnungen wie vorher. zz ist die Axe des kleinsten Trägheitsmomentes, welche hier nicht ganz mit der grössten Längsaxe zusammenfällt.

Fig. 2. Verschiedene Lagen des Versuchsorgans von Acer platanoides während des Beginnes seiner Fallbewegung. n Nussende, f Flügelende, s Schwerpunkt, z Längsaxe, x Queraxe. Die Pfeile deuten die in horizontaler Richtung stattfindende Drehung an. Die jeweilig dem Beschauer zugeneigten Kanten sind stärker konturirt und die eine der beiden Flächen (immer dieselbe!) ist etwas schattirt.

a. Ausgangsstellung zu Beginn des Falles. Fällt mit der Papierfläche zusammen.

b. St. nach 5 cm Fallhöhe. Flügelhälfte der Längsaxe und Hinterhälfte der Queraxe fallen hinter die Papierfläche.

c. „ „ 14 „ Fallh. Flügelhälfte der Längsaxe und Hinterhälfte der Queraxe fallen hinter die Papierfläche.

d. „ „ 20 „ Fallh. Nusshälfte der Längsaxe und Hinterhälfte der Queraxe fallen hinter die Papierfläche.

e. „ „ 25 „ Fallh. Die Längsaxe fällt in, die Vorderhälfte der Queraxe hinter die Papierfläche.

f. „ „ 32 „ Fallh. Flügelhälfte der Längsaxe und Vorderhälfte der Queraxe fallen hinter die Papierfläche.

g. „ „ 40 „ Fallh. Die Längsaxe fällt in, die Hinterhälfte der Queraxe hinter die Papierfläche.

Vergleiche im übrigen hiezu den Text S. 255—263.

Fig. 3. Darstellung der auf eine aufgerollte Zylinderfläche projizirten Kurven der Punkte f, s und n der Längsaxe. Diese Punkte ent-

sprechen den ebenso bezeichneten der Fig. 2. Die Erkl. s. im Text S. 263. Die Kurven f und n sind nicht genau übertragen.

Fig. 4. Schematische Darstellung eines in horizontaler Rotation um die vertikale Raumaxe ξ begriffenen frei fallenden Organs, um eine Vorstellung des Grössenverhältnisses der auf gleichgrosse Flächenelemente (a, b, c) der Ober- und Unterseite wirkenden senkrechten Komponenten des Luftwiderstandes zu geben. Alle Flächenelemente der Unterseite besitzen gleiche Neigung gegen die sie treffenden vertikal aufwärts gerichteten Widerstandskomponenten und bewegen sich mit nahezu gleicher Geschwindigkeit senkrecht abwärts, in Folge dessen sind alle Einzeldrücke des Widerstandes und entsprechend alle vertikalen Komponenten (w_1, w_2 und w_3) einander gleich. Die Flächenelemente der Oberseite liegen alle in der Richtung der nämlichen, durch den Schwerpunkt S gehenden Axe zz, in Folge dessen ist ihre Neigung zum Rotationswiderstande, resp. zu den Einzeldrücken (v_1a, v_2b und v_3c) ebenfalls die gleiche und das Grössenverhältniss der vertikalen Komponenten (W_1, W_2 und W_3) zu den wirksamen Druckgrössen (t_1a, t_2b und t_3c) und zu den ganzen Einzeldrücken bleibt immer das gleiche. Die vertikal abwärts wirkenden Druckkomponenten wachsen wie die Einzeldrücke, entsprechend der mit dem Radius steigenden Geschwindigkeit der Flächenelemente mit dem Quadrat dieses Radius und zwar von Null an (bei S). Wenn W die Grösse für den Radius 1 darstellt, so ist W_2 entsprechend dem zweimal so grossen Radius viermal so gross als W_1. Ebenso ist W_3 entsprechend dem 3mal so grossen Radius 9mal so gross. Der bis zur Einnahme der Gleichgewichtslage erzeugte abwärts wirkende Ueberdruck auf das Flügelende (oder aufwärts wirkende Ueberdruck auf das Nussende) findet um die im Raum horizontale Schwerpunktsaxe $\psi\psi$ statt in der von den Pfeilen angedeuteten Richtung.

Fig. 5. Stellt in perspektivischer Ansicht einen in horizontaler Ebene rotirenden kreisrunden aus Karton ausgeschnittenen Kreisel g i h k mit einer aus einem feinen, unten zugespitzten Holzstäbchen dargestellten körperlichen Axe dar. Derselbe ruhe mit der Spitze dieser Axe auf dem kleinen etwas ausgehöhlten Untersatz C und drehe sich in der Richtung des in die Kreiselfläche eingezeichneten grossen Pfeiles. Im Übrigen vgl. den Text S. 300 u. f. Die beiden grossen Pfeile L und L' zeigen die beiden Scheitelwinkel A s g und B s h an, innerhalb deren die resultirende Momentanaxe A's zu liegen kommt.

Fig. 6. Ganz dasselbe wie Fig. 5, nur rotire der Kreisel nicht auf einer Unterlage, sondern frei durch die Luft herabfallend. Vgl. den Text S. 300 u. f. Die Pfeile L und L' haben dieselbe Bedeutung wie in Fig. 5.

Fig. 7. Schematische Darstellung eines in ruhiger Luft ohne Störung und zwar in der Höhe des betrachtenden Auges rotirenden Organes in zwei um 180° von einander entfernten Stellungen AB und CD

während einer Umdrehung. Der Beschauer sieht das Organ fast in Kantenstellung. As und Cs bedeute den Nusstheil und sB und sD den Flügeltheil. s Schwerpunkt, $\xi\xi$ die im Raume vertikale Rotationsaxe, welche hier mit der Bahn des Schwerpunktes EF zusammenfällt. Der Pfeil deutet die rechtssinnig (wie beim Uhrenzeiger) stattfindende Drehungsrichtung an. m ist der geometrische Mittelpunkt der Organfläche, a der Angriffspunkt der momentanen Resultirenden, p die Grösse und Richtung des Luftwiderstandes. P die Grösse und Richtung der Gesammtresultirenden während einer Umdrehung. Die Längsaxe macht mit der Horizontalen HE einen spitzen Winkel von 7°. Im Übrigen s. d. Text S. 305 u. 306.

Fig. 8. Darstellung des gleichen Vorganges nach Schiefstellung des rotirenden Organes in Folge einer vorher stattgehabten Störung. Die Buchstaben bedeuten dasselbe wie in der vorigen Figur. Die Ansicht für den Beschauer ist die gleiche, nämlich nahezu Kantenstellung. Nur bedeutet hier $\xi\xi$ die ideale Bahnaxe, um welche sich die Bahn EF des Schwerpunktes in linksläufiger Spirale bewegt, $\mu\mu$ die schief gestellte, durch den Schwerpunkt gehende momentane Rotationsaxe, um welche rechtssinnige beschleunigte Rotation stattfindet. Die Gesammtresultirende während eines Umganges (P) greift hier nicht im Schwerpunkt an, sondern etwas seitlich. Sie wirkt mit der Momentgrösse P . us drehend und zwar um die in der Papierebene verlaufende zur μ-Axe senkrechte Schwerpunktsaxe $\chi\chi$. rs ist der wirksame Hebelarm der Kraft p, r_1s derjenige der Kraft p_1. Im Übrigen s. d. Text S. 306 u. 307.

Fig. 9. Vertikalprojektion einer länglich rechteckigen ebenen Platte nmho (mit dem, entspr. dem Typus XII nach zwei Richtungen verschobenen Schwerpunkt s), deren Längsaxe resp. Längskante no einen Winkel von 40° und deren Queraxe resp. Kurzkante nm einen Winkel von 25° mit dem Horizont einschliesst. HE bedeutet die Vertikalprojektion einer durch den Punkt l gelegten Horizontalebene. Der Flächenwinkel der Platte mit dem Horizont beträgt in Folge dessen 51° 14′. Wenn die Platte sich nun, wie es die Pfeile anzeigen, in ruhiger Luft um die im Raum vertikale Schwerpunktsaxe $\psi\psi$ (nach Rechts) dreht, so haben immer nur die in der Richtung der Axen sa, sb, sc..... bis sl liegenden Flächenelemente die gleiche Neigung gegen den in Folge der Drehung sie treffenden Luftwiderstand. Nur die in der Richtung der horizontalen Axe sd gelegenen besitzen z. B. den gleichen Neigungswinkel zu den Luftstrahlen wie zum Horizont, nämlich 51° 20′. Die Flächenelemente welche der Axe sg entsprechen, einen Neigungswinkel von 25°.

Fig. 10. Zur Berechnung des Flächenwinkels einer rechtwinkligen Platte, wenn die Neigungswinkel der Kanten bekannt sind. Vgl. Zusatz 2 zum XII. Typus S. 314.

Fig. 11. Versuchs-Same von Cedrela brasilienis in natürlicher Grösse. a Flächenansicht, c vertikaler Querschnitt durch die Mitte des

Flügels in der Richtung der Linie c d geführt. f Flügelende, g Nussende. b Kantenansicht, aus der Stellung a durch rechtssinnige Drehung um 90° um die Längsaxe hervorgegangen. v k dem Beschauer zugekehrte Vorderkante, w Rücken der Wölbung der queren Konvexität.

Fig. 12. Dasselbe Organ rotirend in zwei 180° von einander entfernten Stellungen. Axenneigung zum Horizont c. 52°. $+\xi - \xi$ die im Raum vertikale Momentanaxe der Drehung, zugleich die Bahn des Schwerpunktes EF anzeigend. Die Drehung ist rechtssinnig und das Organ wendet einmal die Vorderkante (v k) das andere Mal die Hinterkante (h k) dem Beschauer zu. a b stellt eine Horizontale dar.

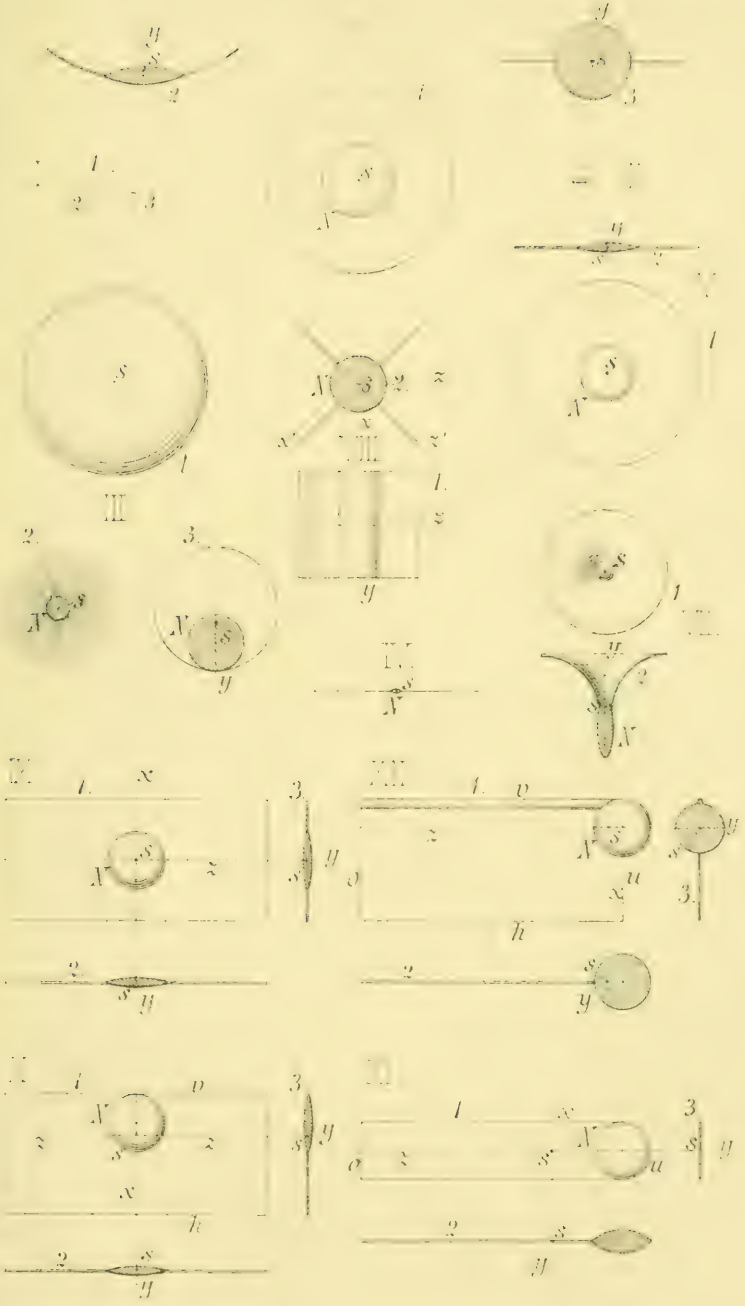
Berichtigungen.

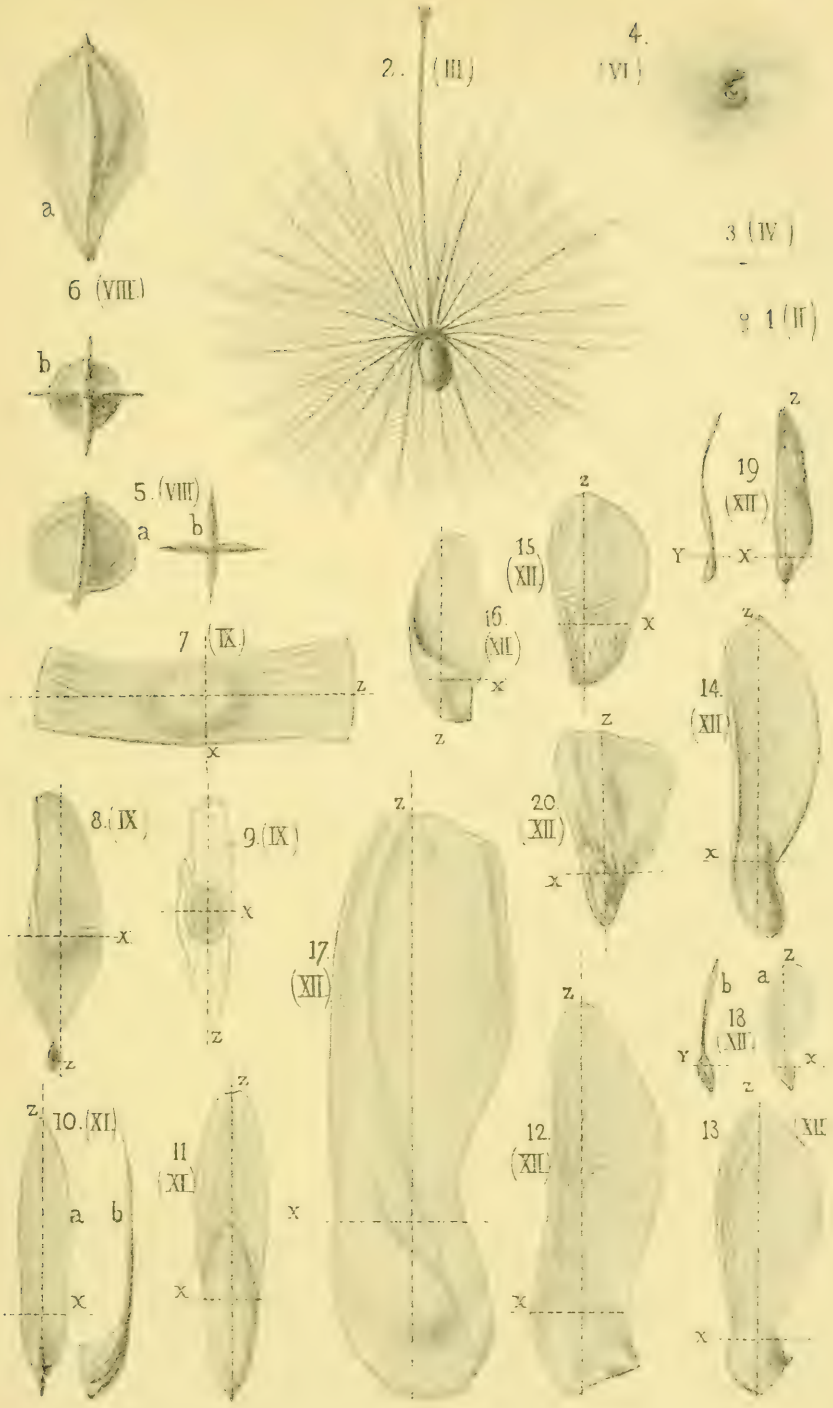
S. 57, Z. 26—29 v. o.: Anstatt „... und mit — dividiren.“ lies: „... und in die, der Formel $v=\sqrt{\frac{2gw}{\gamma f}}$ entsprechende grösste theoretische Fallgeschwindigkeit mit der grössten beobachteten Fallgeschwindigkeit dividiren.“

S. 169, in der untersten Zeile der Tabelle: Anstatt 10 lies $14^1/_2$.

S. 183, Z. 4 v. u.: Anstatt „...erzeugten Zentrifugalkraft wieder...“ lies: „...erzeugten Drehgeschwindigkeit und des dadurch entstehenden, die längere Hälfte nach abwärts drehenden Luftwiderstandes wieder...“.

S. 262, Z. 10 v. u.: Anstatt „88 cm“ lies „91 cm“.


H. Dingler del.
J. Menz grav.



H. Dingler ad nat. del.

Fig. 4 (X.)

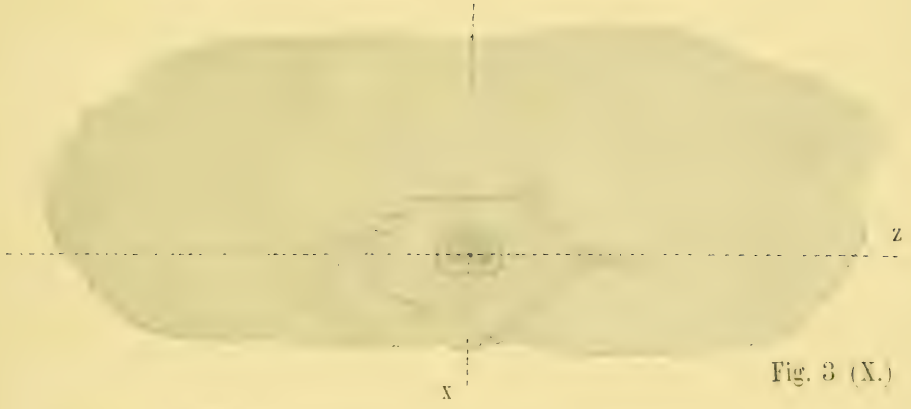


Fig. 3 (X.)

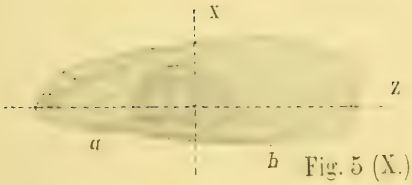
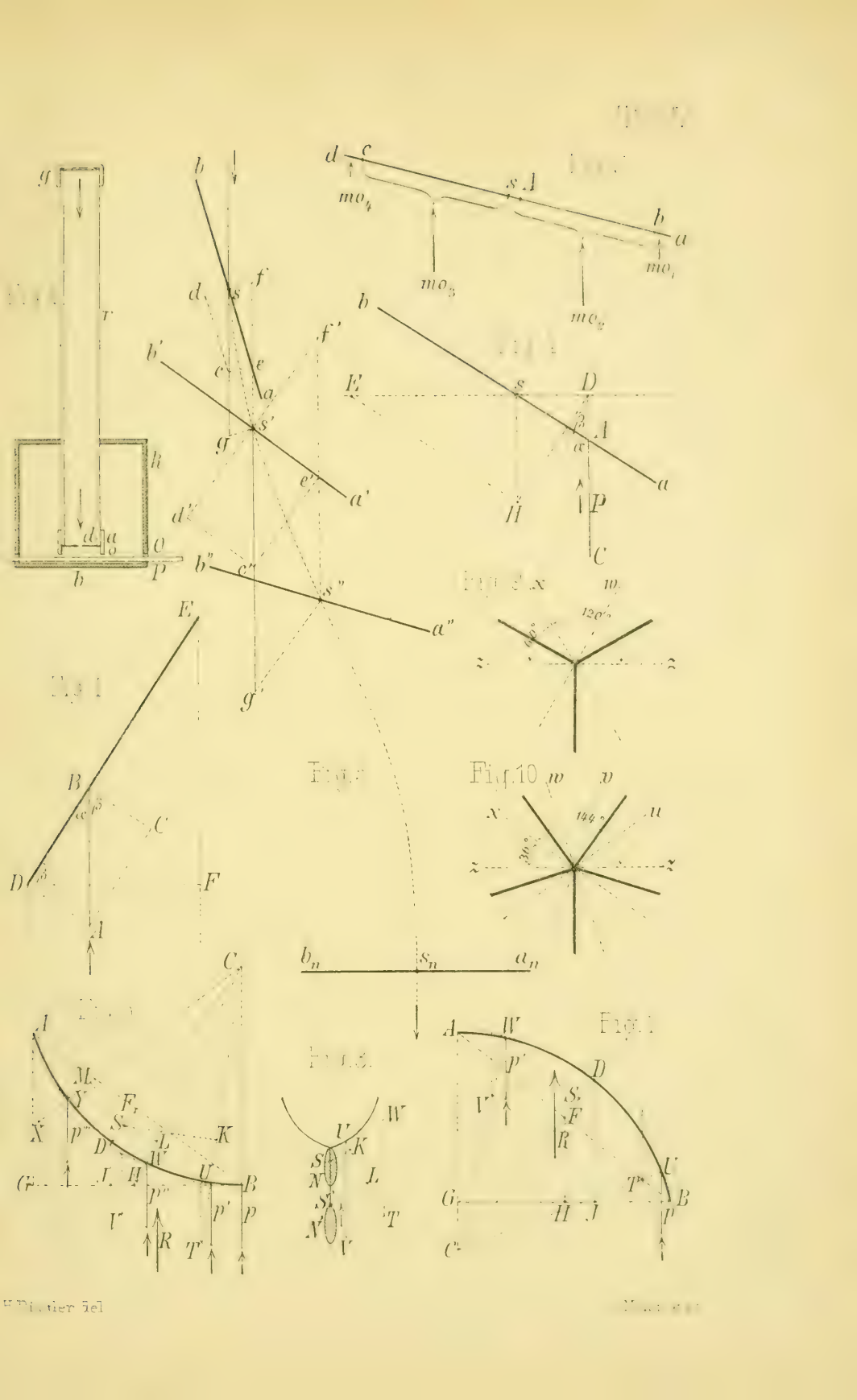


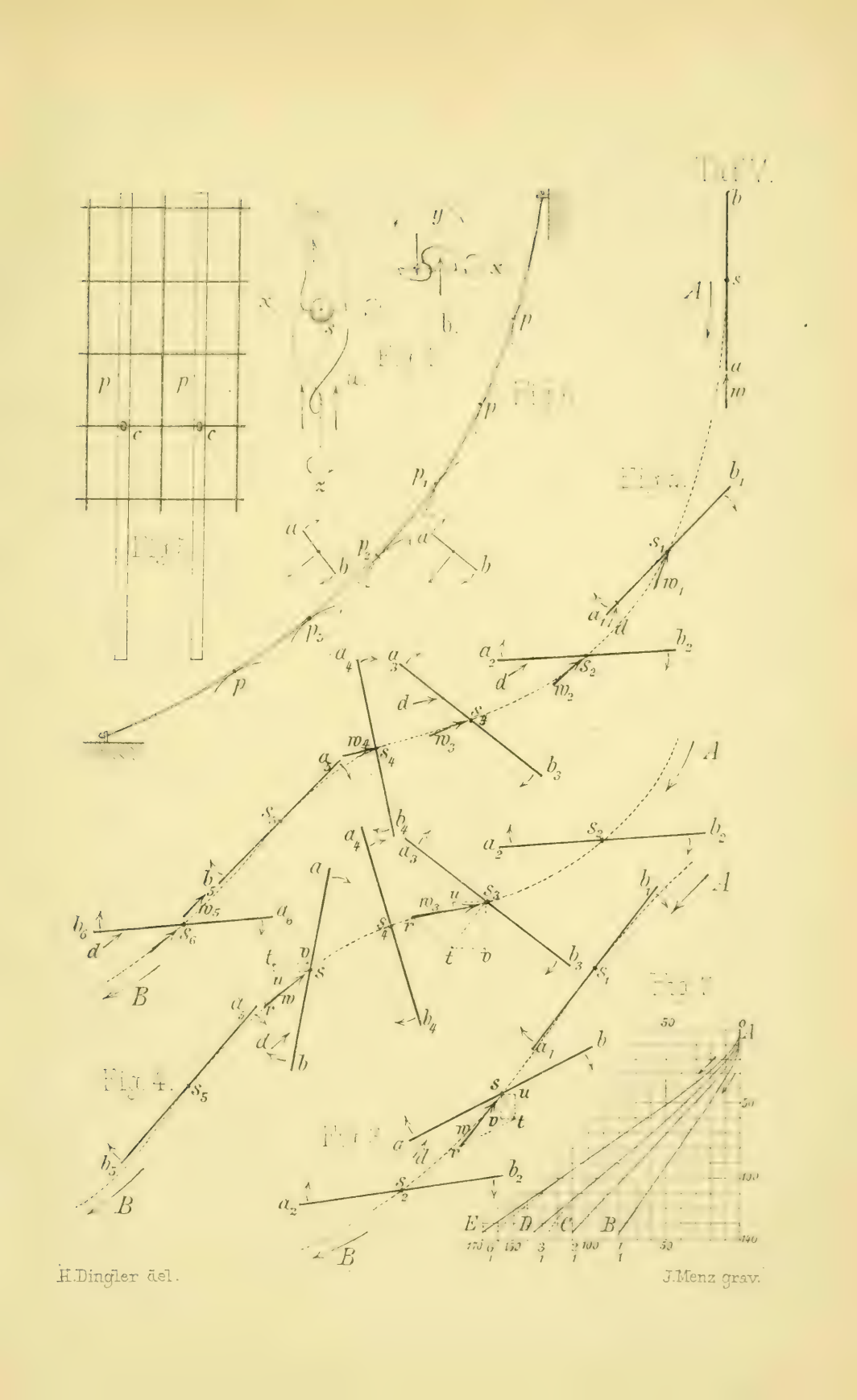
Fig. 5 (X.)

Fig. 2 (VI.)

Fig. 1 (V.)

H. Dingler ad nat. del.




H.Dingler del.
J.Menz grav.

Taf VI.

Fig. 1.

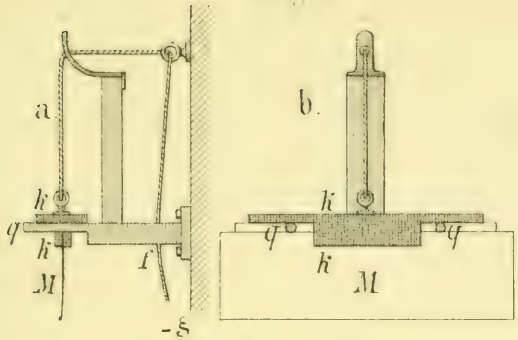


Fig. 3

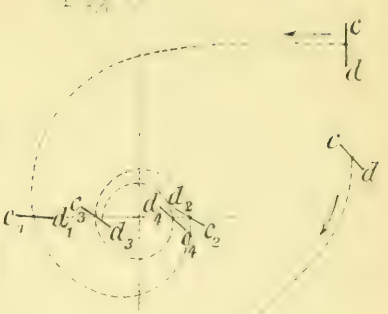


Fig. 5.

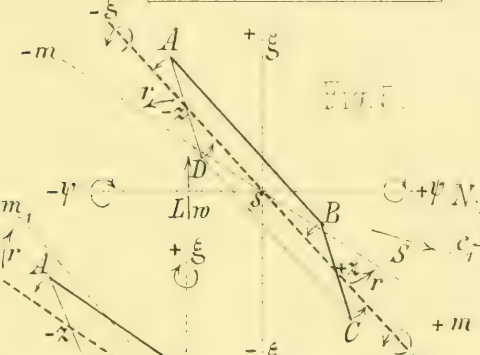


Fig. 6.

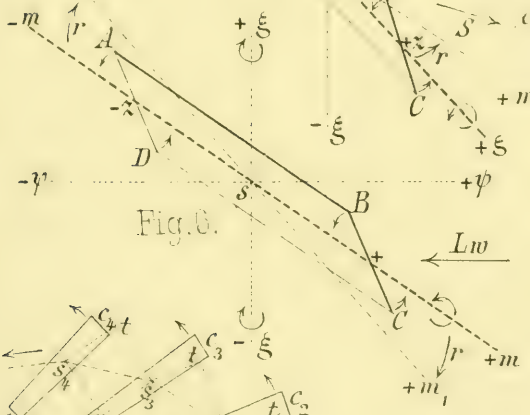


Fig. 4.

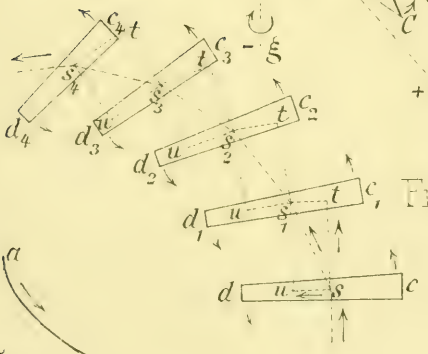


Fig. 7.

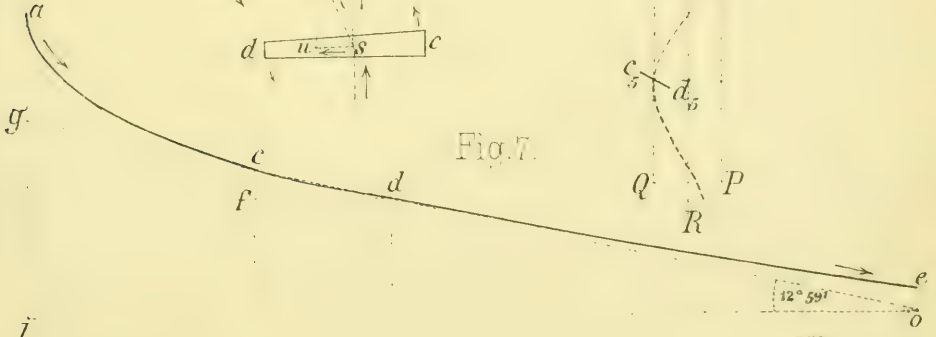
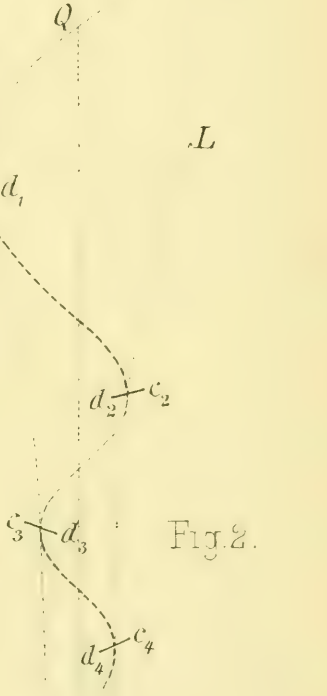
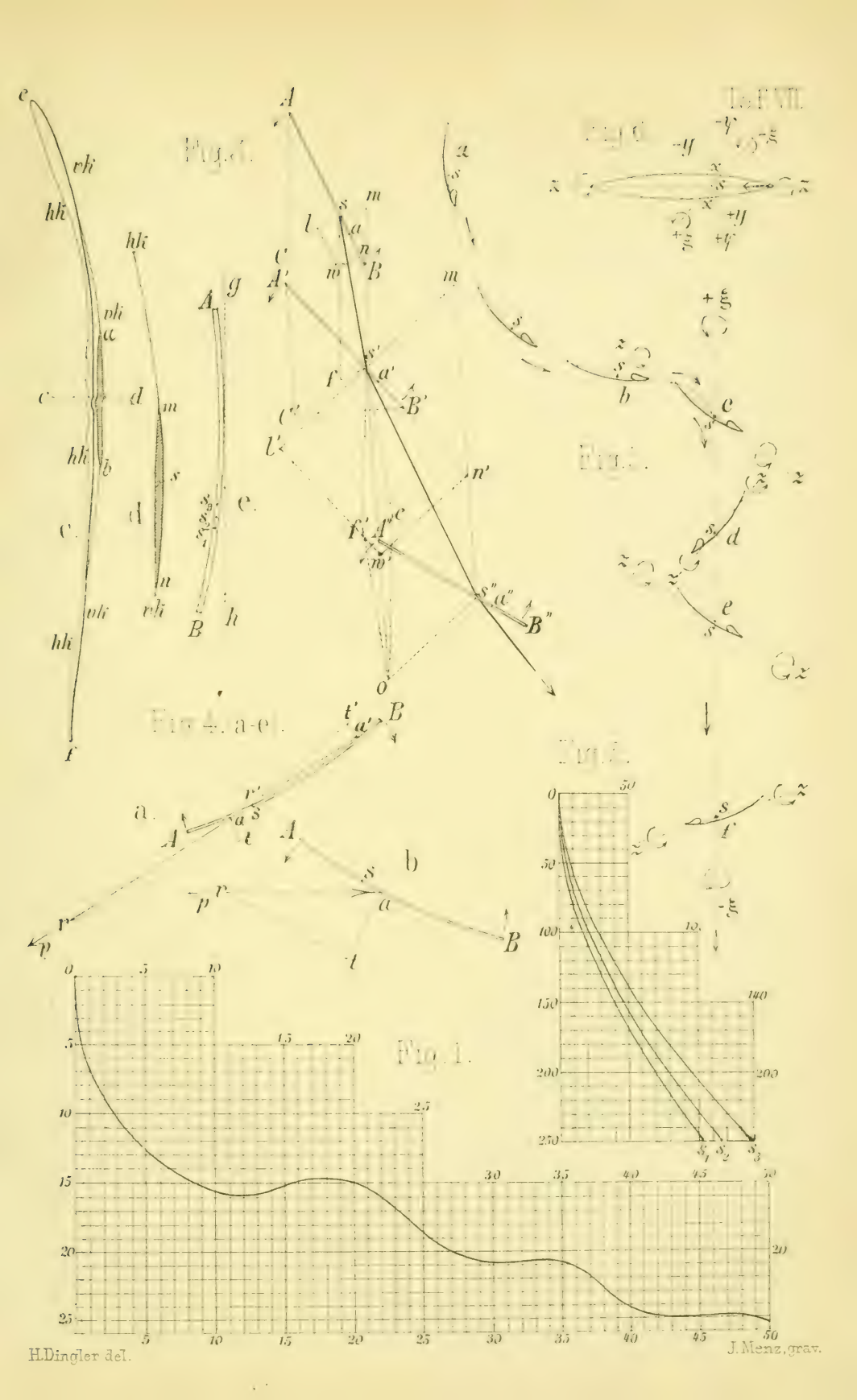


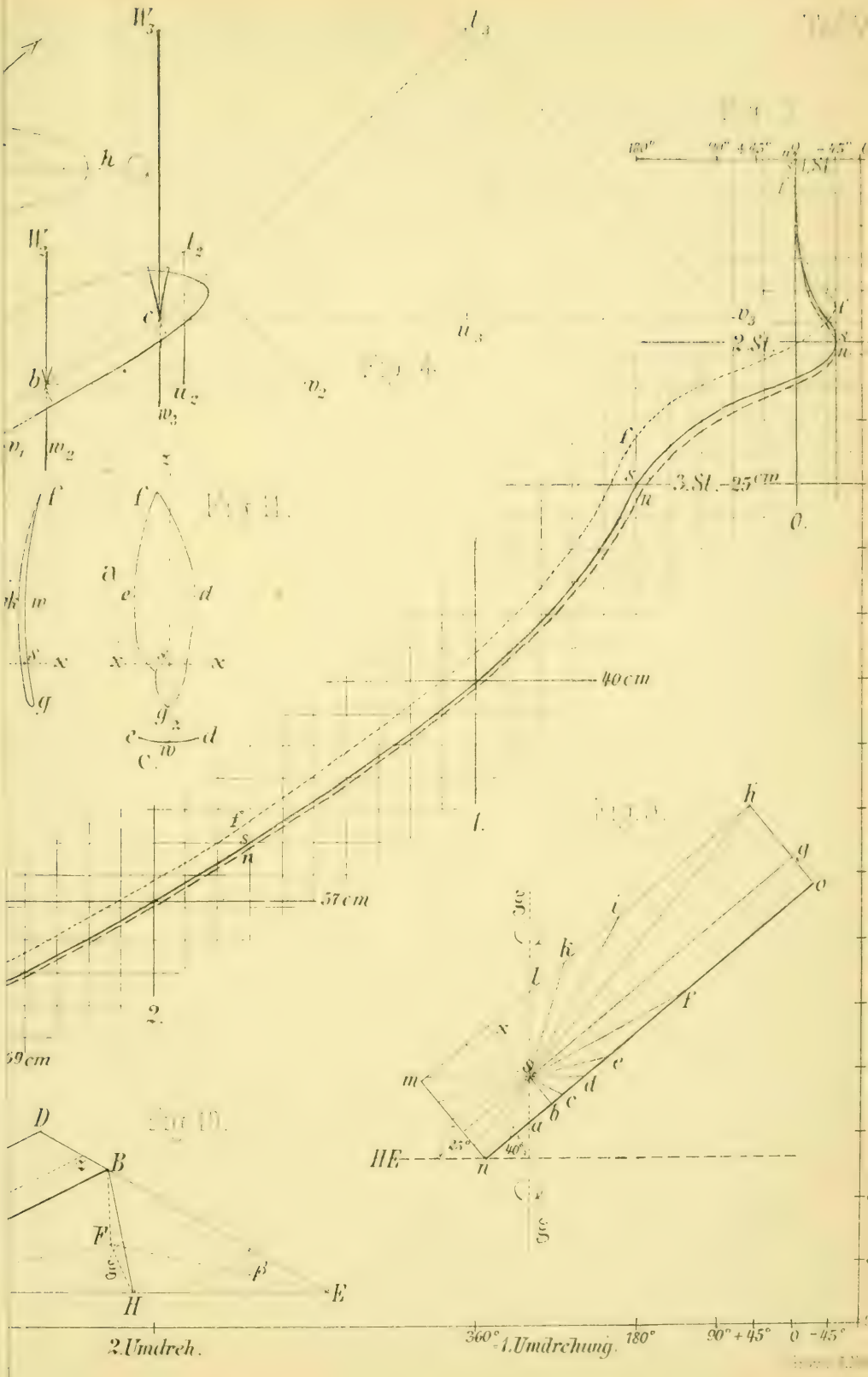
Fig. 2.



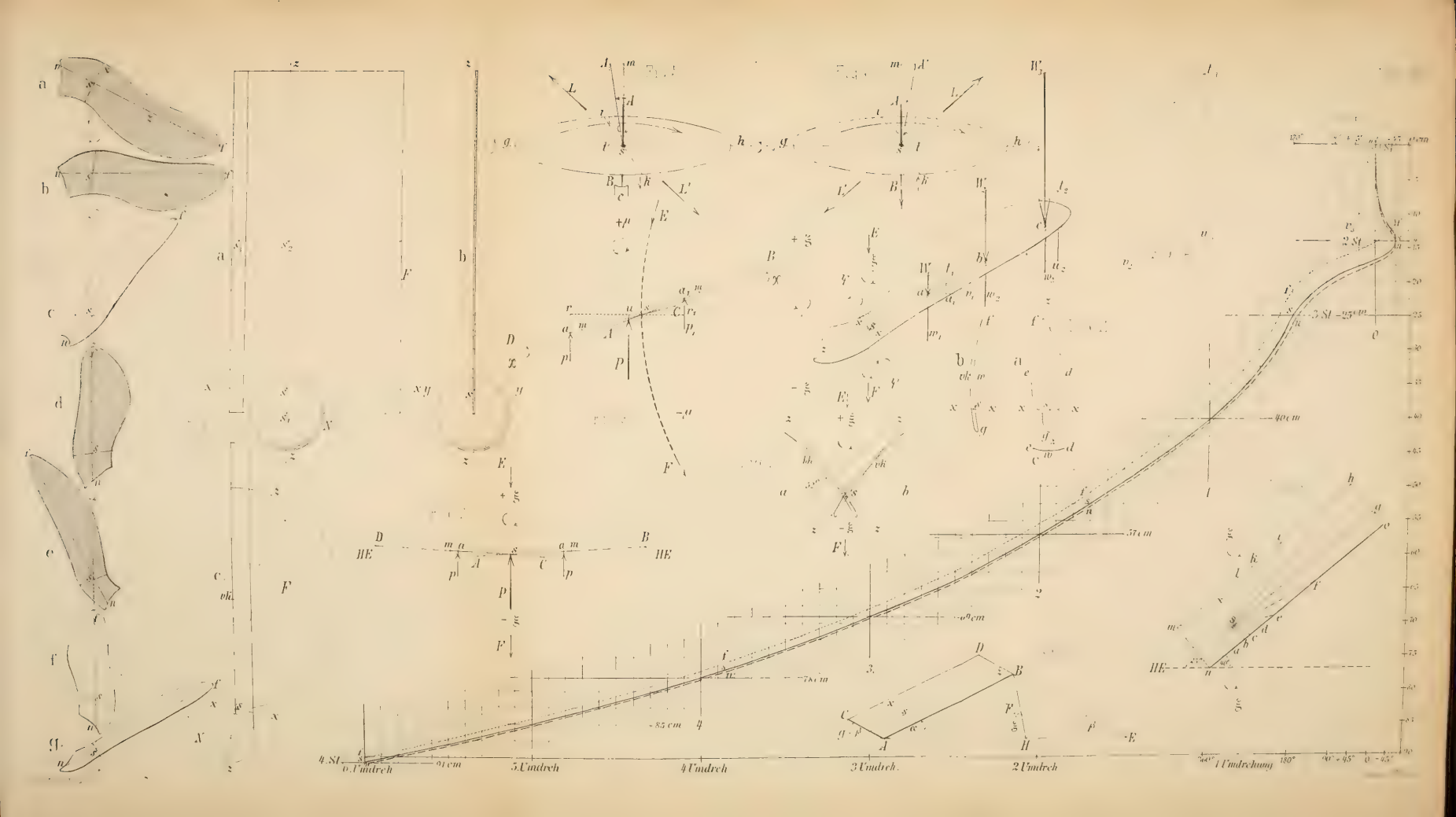
H. Dingler, del

J. Menz, grav.


Taf. VII.
Fig. 1.
Fig. 2.
Fig. 3.
Fig. 4. a-e.
Fig. 5.
Fig. 6.
Fig. 7.
H.Dingler del.
J.Menz, grav.



2.Umdreh.
360° = 1.Umdrehung.
180°
90° + 45°
0
- 45°
1.St.
2.St.
3.St. - 25 cm
40 cm
57 cm
59 cm
HE


0 Umdrch
5 Umdrch
4 Umdrch
3 Umdrch
2 Umdrch
1 Umdrehung
4 St
3 St
2 St
1 St

New York Botanical Garden Library
QK771 .D5 gen
Dingler, Hermann/Die Bewegung der pflanz
3 5185 00015 9408